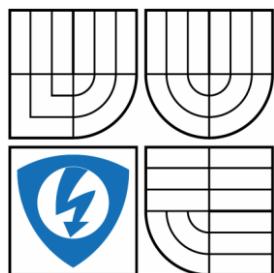


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## INDIKÁTOR BOUŘKY (INDIKÁTOR BLESKŮ)

INDICATOR OF THUNDERSTORMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

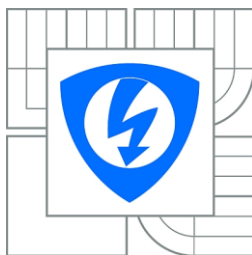
PAVEL STUDENÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav automatizace a měřicí techniky**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Pavel Studený

**Ročník:** 3

**ID:** 147388

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

### Indikátor bouřek

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Rozbor projevů bouřek, rozbor možností indikace bouřek, popsat využití kmitočtů s cílem najít volná pásma pro pasivní příjem, navrhnout blokové schéma indikátoru bouřek a definovat požadavky na dílčí bloky. Na základě předchozího rozboru navrhnete indikátor bouřek, který by byl schopen indikovat počet blesků v okolí pozorovatele. Přístroj by měl být přenosný. Předpokládaná provozní doba bez dobíjení baterií by měla být nejméně 24 hodin.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANOUSEK, K. Rádiové přijímače a vysílače. Skriptum ÚREL, MJ Servis, Brno 2000

[2] Daněk K., Moderní radiový přijímač – kniha o jeho návrhu, BEN 2005, 215 s., ISBN 80-7300-142-X

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 26.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je teoretický rozbor bouřek, blesků a jejich detekcí. Teoretický popis poté postupně přechází k navržení vlastního detektoru. Detektor bude pracovat tak, že při bleskové aktivitě zachytí impulzy, které bleskové výboje generují. Blesky se budou registrovat pomocí připojeného čítače. Po skončení bouře bychom mohli díky informacím z čítače vyhodnotit, jak silná bouře byla.

## **Klíčová slova**

Cumulonimbus, výboj, bouře, indikátor, blesk, oblak, detekce.

## **Abstract**

The aim of this Bachelor thesis is a theoretical analysis of thunderstorms, lightning and their detection. The theoretical description then gradually moving towards designing their own detector. The detector will operate so that when a lightning activity captures pulses which generate lightning. Lightning will register using the attached counter. After the storm could be due to information from the counters to evaluate how strong the storm was.

## **Keywords**

Cumulonimbus, discharge, storm, the indicator, lightning, cloud, detection.

**Bibliografická citace:**

STUDENÝ, P. *Indikátor bouřek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 63 s. Vedoucí bakalářské práce byl Doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou (*bakalářskou*) práci na téma Indikátor bouřek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (*bakalářské*) práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové (*bakalářské*) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (*bakalářské*) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **20.** května 2014

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Milanu Chmelařovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také za jeho ochotu a podnětné návrhy. Také bych chtěl poděkovat své rodině a spolubydlícím za nápomoc při praktické realizaci.

V Brně dne: **20.** května 2014

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Teorie bouřek .....	- 9 -
1.1	Charakteristika bouřek, převzato z [9] .....	- 9 -
1.2	Vznik bouřkového oblaku, převzato z [7] .....	- 10 -
1.3	Projevy bouřek .....	- 10 -
1.3.1	Akustické projevy .....	- 11 -
1.3.2	Srážkové projevy .....	- 12 -
1.3.3	Projevy větrné .....	- 15 -
2	Blesky .....	- 18 -
2.1	Elektřina v atmosféře .....	- 18 -
2.1.1	Vznik nábojů .....	- 18 -
2.1.2	Rozložení náboje v mraku .....	- 21 -
2.2	Princip vzniku bouřkového výboje .....	- 23 -
2.3	Rozdělení bouřkových výbojů .....	- 25 -
2.3.1	Hrotové (bodové) výboje .....	- 25 -
2.3.2	Blesky .....	- 26 -
2.3.3	Rozdělení blesků .....	- 28 -
2.4	Způsoby indikace (detekce) blesků .....	- 31 -
2.4.1	Pozemní detekce .....	- 32 -
2.4.2	Detekce pomocí družic .....	- 34 -
3	Návrh vlastního detektoru .....	- 36 -
3.1	Využití volných kmitočtů pro pasivní příjem .....	- 36 -
3.2	Návrh blokového schématu .....	- 36 -
3.3	Definice parametrů dílčích bloků .....	- 37 -
3.4	Popis jednotlivých bloků .....	- 37 -
3.4.1	Anténa .....	- 38 -
3.4.2	Laděný obvod s indukční vazbou .....	- 39 -
3.4.3	Zesilovač, detektor .....	- 43 -
3.4.4	Tvarovací obvod .....	- 47 -
3.4.5	Čítač .....	- 50 -
3.4.6	Stabilizátor .....	- 52 -
3.4.7	Napájení .....	- 54 -
3.4.8	Indikace zapnutí detektoru .....	- 55 -
4	Závěr .....	- 56 -

5	Seznam rovnic .....	- 57 -
6	Seznam tabulek.....	- 57 -
7	Literatura .....	- 58 -
8	Seznam příloh.....	- 59 -

## Seznam obrázků

obr. 1	Lom zvukové vlny v normálním prostředí (a), při inverzi (b) .....	- 11 -
obr. 2	Princip vzniku akustických stínů, převzato z [6] .....	- 12 -
obr. 3	Princip vzniku sněhových vloček, ledových částic, převzato z [13] .....	- 14 -
obr. 4	Princip vzniku húlavy, převzato z [8] .....	- 16 -
obr. 5	Princip vzniku downburstu, převzato z [8] .....	- 17 -
obr. 6	Rozložení náboje v kapce (a), při rozdělení (b), převzato z [2] .....	- 19 -
obr. 7	Rozložení náboje v mraku, převzato z [1] .....	- 23 -
obr. 8	Kondenzátor „Země- ionosféra“, převzato z [11] .....	- 24 -
obr. 9	Rozložení siločar bez přítomnosti předmětu (vlevo), s předměty (vpravo).....	- 26 -
obr. 10	Princip blesku: vůdčí výboj (horní 3 obrázky), hlavní, převzato z [2] .....	- 27 -
obr. 11	Ukázka IC, CC, CG výbojů, převzato z [10] .....	- 29 -
obr. 12	Princip metody ToA (vlevo), DF (vpravo) , převzato z [3] .....	- 33 -
obr. 13	Blokové schéma detektoru bouřek.....	- 37 -
obr. 14	Laděný obvod s indukční vazbou .....	- 39 -
obr. 15	Paralelní rezonanční obvod.....	- 41 -
obr. 16	Detektor .....	- 43 -
obr. 17	Chování detektoru při zaznamenání bleskové aktivity .....	- 44 -
obr. 18	Chování obvodu při impulsu s odporem R2 .....	- 46 -
obr. 19	Průběh zpracování impulsů.....	- 48 -
obr. 20	Zapojení tvarovacího obvodu .....	- 48 -
obr. 21	Zapojení čítače .....	- 50 -
obr. 22	Zapojení stabilizátoru z katalogu .....	- 53 -
obr. 23	Akumulátor Sanyo .....	- 54 -



# 1. TEORIE BOUŘEK

Než se začneme zabývat problematikou přijímání signálů, vyvolaných elektrickými výboji při bouřkách, musíme se nejdříve dozvědět, jak vůbec takové bouřky vznikají, co je jejich příčinou a jak se taková bouřka vůbec může projevovat. V této kapitole se pokusíme společně proniknout do teorie, která nám pomůže lépe se v této problematice orientovat.

## 1.1 Charakteristika bouřek, převzato z [9]

Co je to vlastně bouřka? Je to přírodní jev doprovázený projevy, se kterým se každý z nás za svůj život mnohokrát setkal. Definice říká, že „Bouřka je soubor elektrických, optických a akustických jevů vznikajících mezi oblaky druhu Cumulonimbus navzájem nebo mezi těmito oblaky a zemí. Bývá doprovázena dalšími meteorologickými jevy, např. nárazy větru, silnými výstupnými a sestupnými vzduchovými proudy, vydatnými přeháňkami (deště, krup, v zimě sněhu), smršťemi atd.“. Aby však k bouřce mohlo dojít, musí být pro ni vytvořeny vhodné podmínky, mezi něž patří:

- Instabilita atmosféry – Při instabilním zvrstvení vzduchu dochází k poklesu teploty s rostoucí výškou. Je to nutná podmínka pro vznik výstupného proudu vzduchu. Instabilita musí zasahovat do vysokých hladin.
- Vysoká relativní vlhkost při zemi i ve výšce.
- Přítomnost výstupného proudu - vnější síly, která iniciuje vertikální pohyb.

Než se dostaneme k samotnému procesu vzniku bouřkového oblaku, musíme si vysvětlit pojem *teplotní gradient*. Teplotní gradient je záporně vzatá změna teploty vzduchu na určitou změnu výšky. Za normálních ideálních podmínek v "suchém" vzduchu (nenasyceném vodní párou) dochází k poklesu teploty asi o 10°C na 1 km. Je-li mlha nebo déšť nebo se nalézáme v oblaku, tento gradient v nasyceném vzduchu dosahuje obvykle 6,5°C/1 km. To proto, že při kondenzaci vodní páry na vodu dochází k uvolňování tepla, které otepluje okolní vzduch. Při opačném procesu, při vypařování kapek naopak dochází k ochlazení, tj. spotřebovávání tepla.

Dále je nutné zmínit to, že z fyzikálních zákonů plyne, že teplejší vzduch se rozpíná, má tedy větší objem a stoupá vzhůru. A že vzduch nasycený vodními párami má schopnost ochlazovat se pomalejší, nežli vzduch „suchý“. Což znamená, že nasycený vzduch dokáže vystoupat výše, protože je déle teplejší a díky tomu vzniká silnější výstupný proud, než u vzduchu suchého. Nyní, když už známe podmínky pro tvorbu bouřky, můžeme si říct, jak spolu všechny tyto podmínky souvisejí a jak v konečném důsledku může vzniknout bouřkový oblak.

## 1.2 Vznik bouřkového oblaku, převzato z [7]

Jak již bylo zmíněno, základní podmínkou je, že existuje instabilita, tedy silný pokles teploty s výškou. Předpokládejme, že zemský povrch ohřátý např. od Slunce ohřívá okolní vzduch. Vzduch ohřátý od zemského povrchu stoupá nahoru a tak vytváří uspořádaný konvektivní proud vzduchu směrem nahoru (vzestupný), který „živí bouři“. Takto ohřátý teplý vzduch stále stoupá a může vystoupit do tzv. kondenzační hladiny, což je výška, ve které dochází k tvorbě oblaku. Tato hladina je však proměnná a nachází se pokaždé v jiné výšce v závislosti na teplotě a vlhkosti vzduchu. To, že se začne oblak vytvářet, až ve vyšší hladině je způsobeno nižší vlhkostí (nedostatkem vodní páry).

- Výška, ve které se nachází kondenzační hladina, je různá a závisí mimo jiné na vlhkosti vzduchu - čím je vzduch vlhčí, tím leží kondenzační hladina níž
- Maximální obsah vodní páry v chladném vzduchu je nižší než ve vzduchu teplém. Překročí-li pára maximálního obsahu, začne kondenzovat
- Teplota, při které dochází ke kondenzaci, se nazývá rosný bod.
- Dojde-li v kondenzační hladině k dosažení teploty rosného bodu, začne kondenzovat a vytvářet oblak.
- Kondenzace vodní páry je změna na kapalné skupenství.
- Produktem kondenzace jsou drobné vodní kapky, které jsou na rozdíl od vodní páry viditelné.

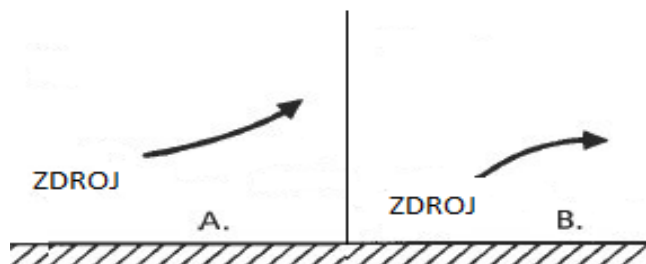
Zmíněným postupem se vytváří oblak zvaný Cumulus, který pokud bude růst ve vertikálním směru, může přejít až do velikosti našeho bouřkového oblaku zvaného **Cumulonimbus**. Ten oblak v průběhu bouře prochází různým životním cyklem vývoje, mezi něž patří stádium vývoje (cumulu), stádium zralosti a konečně stádium rozpadu. Podle jeho tvarů také můžeme rozeznávat různé druhy oblaků, to však není podstatou této práce.

## 1.3 Projevy bouřek

Jak je známo, každý fyzikální jev se musí nějak projevit. Bouře má spousty projevů od vizuálních, akustických, větrných přes elektrické. My si tyto jevy pokusíme obecně popsat a zaměříme se nejvíce na projevy elektrické (blesky). Projevy akustické, ani vizuální nejsou pro člověka nebezpečné. Co se týče větrných projevů, ty mohou být v extrémních případech velmi nebezpečné, na našem území však k takovým případům nedochází. Elektrické projevy bouří jsou však pro člověka velmi nebezpečné, a to i v případě že se nachází poblíž místa, kde k tomuto projevu dojde. Více se však dozvíme v jednotlivých kapitolách.

### 1.3.1 Akustické projevy

Za normálních podmínek, kdy teplota s rostoucí výškou klesá, roste akustický index lomu spolu s vertikální vzdáleností od zemského povrchu a studenější vrstvy atmosféry se proto jeví jako akusticky hustější. S lomem zvukových paprsků v atmosféře jsou spojeny 2 fyzikální jevy: Anomální slyšitelnost, akustický stín. Posledním akustickým jevem, který však není spjat s lomem zvukového paprsku, je tzv. rázová vlna.



obr. 1 Lom zvukové vlny v normálním prostředí (a), při inverzi (b)

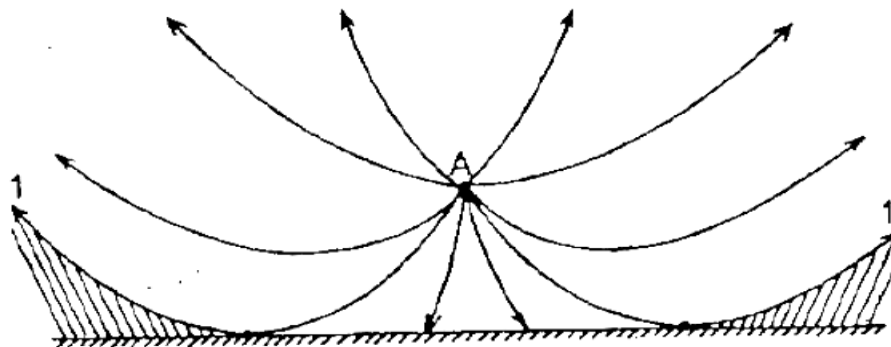
#### 1.3.1.1 Rázové vlny, převzato z [6]

Tyto vlny vznikají při elektrických výbojích, čili v našem případě při projevu blesků. V případě blesků je rázová vlna charakterizovaná jako hrom. Ten vzniká při náhlém vzrůstu teploty, tlaku a rozpínání vzduchu ohřátého bleskem. Stejně jako obyčejné vlny nese rázová vlna energii, která se šíří rozruchem do všech směrů. Rázová vlna má i destrukční schopnosti, které jsou závislé na vzdálenosti předmětu od epicentra jejího vzniku. Pokud se předmět nachází v blízkosti epicentra, bude vystaven této velké energii, která působí destrukčně. Protože nemáme ideální prostředí, rázová vlna se po čase utlumí např. vlivem vzduchu a tím mizí její destrukční schopnosti a stává se pouze zvukovou vlnou.

#### 1.3.1.2 Akustické stíny, převzato z [6]

Tento fyzikální jev je bezprostředně spojen s lomem zvukových paprsků v atmosféře. Předpoklad k projevu akustických stínů je, že teplota vzduchu s výškou klesá. Princip je založen na akustickém zdroji zvuku, v našem případě bouřkový oblak, v němž zrovna proběhne výboj mezi horním kladně nabitým a dolním záporně nabitým centrem, nacházející se v určité výšce nad zemským povrchem. Stane se, že paprsky zvuku, které procházejí atmosférou, se lámou od kolmice, protože přechází z chladnějšího do teplejšího prostředí (obr. 1). Přechod je způsoben tím, že teplejší vzduch, který se nalézá u zemského povrchu, je řidší, než vzduch studený, díky čemuž má jiný index lomu. U zemského povrchu dochází k tzv. totálnímu odrazu, což znamená, že paprsek

neproniká do dalšího prostředí (viz obr. 2). Z toho plyne, že zvuk za touto hranicí nedokáže proniknout do některých oblastí, které nazýváme akustické stíny. Od tohoto bodu se poté již paprsky lámou ke kolmici. To znamená, že pro pozorovatele v místě akustického stínu nebudou slyšitelné projevy bouřky a blesk může vnímat pouze jako blýskavici.



obr. 2 Princip vzniku akustických stínů, převzato z [6]

#### 1.3.1.3 Anomální slyšitelnost, převzato z [6]

Tento jev vznikne při styku dvou prostředí s různou hustotou, na kterých pak dochází k lomu akustického paprsku. Pro vznik anomální slyšitelnosti je nutná podmínka výskytu tzv. výškových inverzí teploty. Tyto inverze znamenají, že s rostoucí výškou teplota neklesá, ale naopak stoupá. Uvažujme nyní dostatečně silný zdroj zvuku například bouřkový oblak. Princip je založen na šíření zvukového paprsku směrem vzhůru, kde se odrazí od inverzí nazpět k zemskému povrchu. K odrazu dojde proto, že se paprsek začne lámat od kolmice odrazem od teplého vzduchu ve výšce. U povrchu vzniká tzv. zóna anomální slyšitelnosti, která následuje za zónou ticha. Zóna ticha je vytvořena tlumením zvuku vlivem okolí. Pozorovatel v místě dopadu odraženého zvukového paprsku tedy může vnímat zvuk, který by jinak slyšet nemohl, pokud by stál před místem dopadu. Výškové inverze teploty se vyskytují častěji v zimě než v létě. Díky této skutečnosti se stává, že se tento jev při bouřkách moc nevyskytuje.

#### 1.3.2 Srážkové projevy

Pro pochopení srážkových i větrných projevů bouřek je nutné si uvědomit, co tyto projevy způsobuje a co mají společného. Příčinou těchto projevů je proudění vzduchu uvnitř bouřkového mraku a také pod jeho základnou. V kapitole 1.2 byl popsán vznik bouřkového oblaku z vnějšího pohledu, pro nás nyní bude důležité zjistit, jaké děje spojené s prouděním vzduchu probíhají uvnitř oblaku.

### 1.3.2.1 Kondenzace vodní páry

Nezbytným požadavkem pro tvorbu vodních kapiček, ale i oblaků je kondenzace vodní páry, která byla stručně vysvětlena již dříve. Nyní si však tento jev přiblížíme. Celá podstata kondenzace vodní páry a tudíž i vzniku vodních kapek je založena na existenci tzv. kondenzačních jader, které napomáhají v přechodu do kapalné fáze. Těmito jádry můžeme nazývat částičky prachu, pylovými zrny, sopečným popelem, krystaly solí. Jejich velikosti jsou extrémně malé s hodnotami řádově  $10^{-8}$  až  $10^{-5}$  m, důležitá je však jejich schopnost vázat na sebe vodu a přítomnost elektrického náboje na těchto částicích. Tyto kondenzační jádra, které se pohybují volně v atmosféře, na sebe zachycují jednotlivé molekuly vody  $H_2O$  obsažené ve vodních parách a tímto skládáním molekul se nakonec, v úrovni kondenzační hladiny, vytvoří kapičky vody, které jsou na rozdíl od páry viditelné. Při vytvoření vodní kapičky vlivem kondenzace dochází k uvolňování tepla a kapka je tedy vždy teplejší než okolní vzduch. Pokud uvažujeme, kolik kapiček se v mraku nachází, zjistíme, že vydává velké množství energie a tepla.

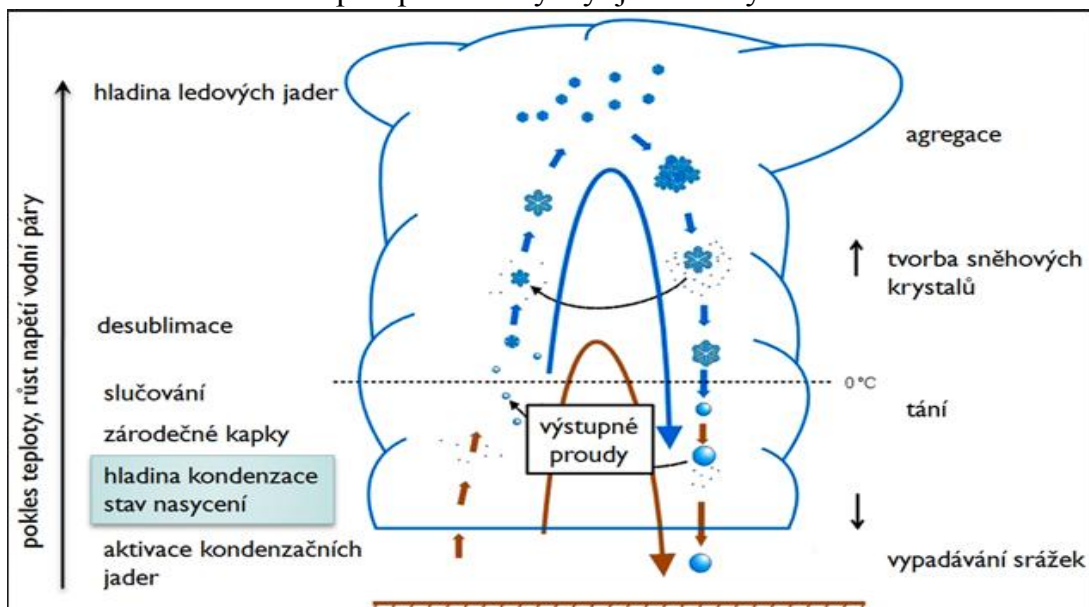
### 1.3.2.2 Koalescence, převzato z [6]

Tento jev je charakteristický tím, že dochází k postupnému narůstání a seskupování vodních kapek. K tomu dochází vlivem působení různých pohybů kapiček a také vlivem okolního prostředí. Mezi tyto vlivy může patřit například:

- **Spontánní koalescence** – Vzniká trhavými pohyby vznikajícími vlivem nárazů vzduchu na okolní molekuly. Efektivita tohoto procesu je malá.
- **Gravitační koalescence** – Vzniká tehdy, pokud se v oblaku již nachází kapky s většími rozměry. Tyto kapky mají díky svým rozměrům také větší hmotnost, což způsobí rychlejší pád směrem k zemi vlivem působení gravitace. Takto padající kapky dohání menší, pomalejší kapky, které se následně spojí a narůstají. Takový jev můžeme pozorovat např. při stékajících kapkách na oknech, kdy větší kapky dohání menší, spojí se a stékají rychleji. Efektivita tohoto jevu je velká.
- **Elektrostatická koalescence** - Vzniká na základě vzájemného přitahování kapiček nesoucích elektrické náboje opačných znamének. Může docházet také k přitahování mezi nabitou a nenabitou kapkou, neboť kapka nesoucí náboj, vyvolá u elektricky nenabitě kapky polarizaci, takže se na straně nenabitě kapky indukuje náboj opačného znaménka a stejné velikosti. Efektivnost tohoto typu se předpokládá u kapek do velikosti 15 mikrometrů.
- **Turbulentní koalescence** – Je podmíněna existencí intenzivních nepravidelných pohybů vzduchu v oblaku. Jde v podstatě o srážení kapek vlivem turbulentních proudů vzduchu.
- **Hydrodynamická koalescence** - vzniká na základě nahuštění proudnic v prostoru mezi vzduchem obtékanými kapičkami pohybujícími se souhlasným směrem.

### 1.3.2.3 Vznik ledových částic v oblacích

Pro vysvětlení vzniku ledových částic je nutné definovat si pojem přechlazená voda. O přechlazené vodě mluvíme tehdy, pokud vodní kapka setrvává v kapalném skupenství i hluboko pod bodem mrazu. Bylo prokázáno, že v takovém stavu může vodní kapka zůstat až k teplotám  $-42^{\circ}\text{C}$ . K tomu aby vodní kapka zamrzla dříve, než při této teplotě je důležité, aby se střetla s tzv. krystalizačním jádrem, díky kterému zamrzne. Pro zamrznutí kapky to ovšem není nutná podmínka, takže i bez krystalizačních jader může kapka zamrznout. Oblaky v chladnějších oblastech jsou pak směsicí vodních kapek ve spodní části a v horní části se nachází přechlazené vodní kapky a ledové krystalky. Ledové krystalky přitahují přechlazené kapky, které na nich zmrznou. Jak krystalky rostou a lepí se na sebe, vytvářejí se sněhové vločky (viz obr. 3). Čím výše v oblacích se vodní kapka nalézá, tím větší je šance jejího zamrznutí, a v okolí 9 km nad Zemí se předpokládá výskyt jen ledových částic.



obr. 3 Princip vzniku sněhových vloček, ledových částic, převzato z [13]

### 1.3.2.4 Vznik krup

Kroupa je vlastně ledová kapka, která se sráží s kapičkami přechlazené vody a tím se zvrství, a zvyšuje svou odolnost proti roztátí. Princip vrstvení spočívá v tom, že padající ledová kapka může být zachycena vzestupným proudem vzduchu, kde se sráží buď s ostatními ledovými částicemi, nebo s vodními kapkami. Při tomto vrstvení může tedy dosáhnout různých rozměrů od 5-50 mm. A jelikož je mohutná, nestačí při pádu roztát. (viz obr. 3)

#### 1.3.2.5 Vznik deště

Vznik kapalných srážek se zakládá na 2 způsobech, které spolu vzájemně působí.

- Prvním principem vzniku srážek je podmíněn existencí ledových kapek, které se začnou opět srážet s vodními kapkami, a tím se zvětší jejich hmotnost, takže začnou klesat směrem k zemskému povrchu. V oblasti kolem 3 km, kde se zhruba nachází úroveň 0°C pak začínají ledové kapky tát a stávají se z ní kapky dešťové. Rozdíl oproti padání krup je v tom, že ledová kapka, která se srazí s vodní kapkou, nebude zachycena výstupným proudem, kde by se proces opakoval, ale padá rovnou k zemi, kde stihne roztát.
- V důsledku vypadávání srážek i z tzv. teplých mraků, které leží v úrovni pod výškou 3 km, kde nemůže docházet ke vzniku ledových kapek, musí existovat ještě další způsob vypadávání srážek. V mracích se vyskytují vzestupné proudy, díky kterým vzduch stoupá do chladnějších míst a jeho vlhkost se sráží. Množství kapiček se zvětšuje, začínají se spojovat. Větší kapky se již neudrží ve vzestupných proudech a klesají dolů, kde buď vypadávají jako déšť nebo se odporem vzduchu štěpí a znovu stoupají vzhůru. (Princip vzniku viz obr. 3).

### 1.3.3 Projevy větrné

Každá bouřka je vždy doprovázena větrnými projevy. Mohou to být vzestupné i sestupné proudy, které jsou důležité pro vznik bouřky, ale mohou to být i projevy ničivé, které si nyní přiblížíme. Klasifikace intenzity větrné aktivity je posuzována na základě rychlosti větru. Základní tabulka s přehledem intenzity větru je tvořena tzv. Beaufortovou stupnicí, která značí vítr čísly 0-12. Další možnou stupnicí je tzv. Fujitova stupnice s rychlostí větru a se slovním popisem účinků a škod tornád, které zařadil do škály stupňů od 0-5. Kromě této klasifikace však bouře obsahuje ještě další projevy.

#### 1.3.3.1 Tromba (tornádo)

Tromba je extrémním projevem větru. Je to rychle rotující větrný vír, který pokud se dotkne země, tak se mění v tornádo. Rychlosti větru v tornádu mohou dosahovat neuvěřitelných rychlostí (až 500 km/h) a téměř vždy znamenají zkázu všemu, co víru přijde do cesty. Tromby můžeme rozlišovat na malé a velké.

- **Malé tromby** jsou menší přízemní víry, s rozměry od několika decimetrů po jednotky metrů. Jejich existenci signalizuje přítomnost vířícího prachu, písku, listí, apod. Malé tromby vznikají při přehřátí zemského povrchu (poušť, pole, letištní plocha, apod.) a mají vzestupnou tendenci. Za malou trombu mohou být pokládány i malé drobné víry, písečné a prašné víry. Ve výjimečných případech může tato tromba „vyrůst“ až do výšky několika kilometrů. Mohou vznikat i za jasného počasí a jejich účinky nejsou ničivé.

- **Velké tromby (tornáda).** Je to silně rotující vír vyskytující se pod spodní základnou konvekčních bouří, který se během své existence alespoň jednou dotkne zemského povrchu a je dostatečně silný, aby na něm mohl způsobit hmotné škody. Tornáda obvykle vznikají v instabilním vlhkém tropickém vzduchu, kde musí dojít ke střetnutí velmi vlhkého vzduchu (většinou oceánského) se vzduchem velmi teplým a suchým (pevninským). Vzhled tromby je trychtýřovitý. Vyskytují se nejčastěji v souvislosti s výskytem našich bouřkových oblaků, které bývají uspořádány do pásů a tvoří typickou čáru instability. V pásu, kudy tornádo prochází, působí obrovské hmotné škody, které jsou způsobeny tlakovým gradientem uvnitř tornáda. Zde tlak může klesat až k pouhým 600 hPa, což vytváří tzv. *savý vír*. V případě, že tromba dosáhla země, je klasifikována stupněm  $F_0$  až  $F_5$  Fujitovy stupnice.

#### 1.3.3.2 Húlava (wind squall)

Jedná se v podstatě o silný nárazovitý přízemní vítr, který vzniká před bouřkou. Nárazovitost vzniká tím, že v kumulonimbech a pod nimi jsou silné výstupné a sestupné pohyby charakteru vírů s horizontální osou. V čele přicházející bouřky se vyskytuje silný vzestupný proud a těsně za ní oblast srážek a sestupné proudění. V prostoru srážek prudce klesá dohlednost na zemi a základna oblačnosti někdy dosáhne až k povrchu země (100 m a méně). (viz obr. 4). Nárazy větru dosahují až 45 m/s. Húlavy se vyskytují především v odpoledních hodinách, kdy se vytvářejí místní bouřky. Přesto, že tento jev má krátkodobý charakter, vytváří velmi nebezpečné podmínky, pro vzlet a přistání a je nutné přerušit letovou činnost až do ustálení podmínek po přechodu bouřky.



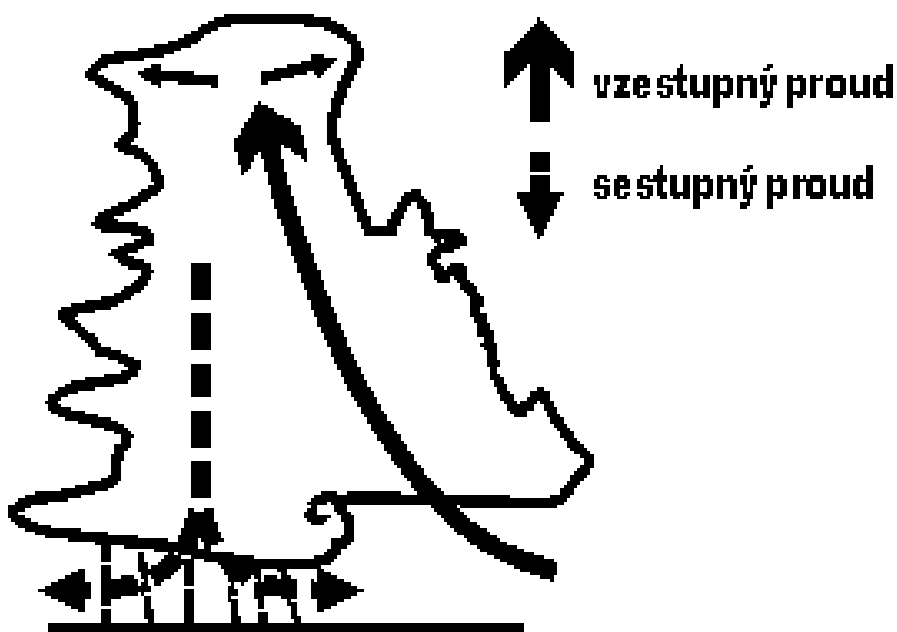
obr. 4 Princip vzniku húlavy, převzato z [8]



### 1.3.3.3 Downburst

Jedná se o extrémně silný sestupný proud vázaný na konvektivní oblačnost, který je příčinou vzniku ničivých divergujících větrů u zemského povrchu a který může způsobit značné hmotné škody. Namísto plynulého sestupného proudu může dojít k tomu, že se v horní polovině bouře nahromadí velké množství krup. V jistém okamžiku se takto vytvořená "kapsa" začne propadat k zemi. Táním ledu a odpařováním kapek obsažených v této kapse dochází k prudkému ochlazení, tím se tento objem vzduchu stane výrazně těžším než za normálních podmínek a díky tomu se zvětší i jeho pádová rychlost.

Po dopadu na zemský povrch se downburst začne prudce "rozlévat" do okolí dopadu, především ve směru postupu bouře. Destruktivní účinek je pak umocněn vyšší hustotou chladného vzduchu, případně přítomností velkého množství krup, dopadajících vysokou rychlostí. Downburst je většinou krátkodobou záležitostí (5 -10 minut), jako jev může trvat o něco déle. Bouře však může vygenerovat celou sérii downburstů a přerušovaná stopa škod tak může dosáhnout i desítky kilometrů. **Microburst** je downburst s průměrem do 4 km, **macroburst** s větším než 4 km. Škody způsobené microbursty na první pohled mohou připomínat škody způsobené slabšími až středně silnými tornády.



obr. 5 Princip vzniku downburstu, převzato z [8]

## 2 BLESKY

Vzhledem k tomu, že toto téma je s ohledem na zaměření této práce jedním z nejdůležitějších, zaslouží si vlastní kapitolu, i když stále spadá pod projevy bouřky (elektrické, akustické, optické). V této kapitole si detailně probereme příčiny a samotný vznik blesků, jejich rozdělení a také jejich detekci, díky které posléze budeme moci přejít k návrhu našeho indikátoru.

### 2.1 Elektřina v atmosféře

Než se dostaneme k samotnému popisu vzniku blesků, je nutné se nejdříve seznámit s okolnostmi, které k jeho vzniku vedou. A s faktem, že se v naší atmosféře pohybuje ohromné množství elektrických nábojů, které ke vzniku našeho výboje vedou.

#### 2.1.1 Vznik nábojů

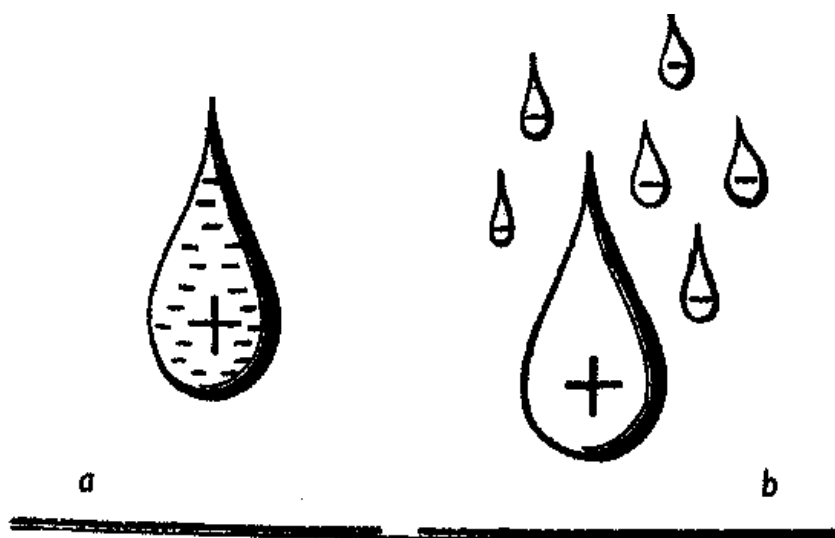
V této části si nejdříve probereme detailní rozdělení našich nosičů náboje, čili vodních kapek a ledových krystalů. A následně probereme teorie, které vedou ke vzniku elektrizace mraků, a tím pomáhají bleskovému výboji. Tyto teorie jsou celkem 2, první teorie je založena na tzv. separaci iontů (třením vodních kapek) a druhá na vzniku náboje pomocí působení záření (nejčastěji kosmického). Dále je nutné zmínit výskyt elektrických částic, které se ve vzduchu pohybují, a které umožňují elektrizaci vzduchu. Vzduch, jak známo se chová jako izolant, jelikož jeho vodivost je malá a blízká 0, to ovšem platí jen v blízkosti zemského povrchu, s rostoucí výškou se jeho vodivost zvětšuje, proč bude uvedeno dále. Nosiči elektrické vodivosti vzduchu jsou atmosférické ionty, které se volně nachází v ovzduší. Aby se atmosférický iont dostal ze svého původního elektroneutrálního stavu a stal se elektricky nabitý, musí u něj dojít k **ionizaci**.

Při ní dochází u jednotlivých molekul k odtržení valenčních elektronů (vzniká částice s přebytkem kladného náboje, čili kation), nebo k jejich zachycení na jiných molekulách (částice s přebytkem záporného náboje, čili anion). Tomuto odtržení iontů z atomu se říká separace a bude probrána následně.

##### 2.1.1.1 Rozložení náboje v kapce

Než si vysvětlíme co je příčinou ionizace, je nutné znát elektrickou strukturu kapky. Kapka vytvořená pomocí kondenzace vodní páry, je téměř totožná s modelem atomu. Také obsahuje jádro a jeho obal a elektřina v něm je rovnoměrně rozložena. Ve svém jádru má každá kapka kladnou část elektřiny

(proton), a v jeho obalu je stejné množství elektriny záporné (elektron). Kapka je tvořena tak, že obsahuje velké jádro protonu ve svém středu, kolem kterého obíhá větší počet menších elektronů (viz. obr. 6). Pokud je náboj těchto protonů a elektronů stejný, kapka je elektricky neutrální, a tak nejeví žádné elektrické vlastnosti. Pokud dojde k tomu, že je kapka nějakým způsobem deformována (nejčastěji vlivem větru, záření). Rozdělí se na části, přičemž uvolněné vnější kapky jsou nabitý zápornou elektrinou, a zbylá větší a těžší část je nabitá elektrinou kladnou. Toto rozložení náboje v kapce plné, i rozdělené je pro další zkoumání principu vzniku blesku velmi důležité.



obr. 6 Rozložení náboje v kapce (a), při rozdělení (b), převzato z [2]

#### 2.1.1.2 Ionizace vlivem působení kosmického záření

Hlavní příčinou ionizace vzduchu je působení kosmického záření, pronikajícího do zemské atmosféry. Důkazem toho je růst elektrické vodivosti vzduchu s výškou, jelikož záření je tím silnější, čím dále je od zemského povrchu. Vlivem paprsků vyzařujících z vesmíru se rozštěpují atomy a molekuly vzduchu na části nabité různými druhy elektriny. Štěpení atomů kyslíku a dusíku vzduchu tj. jeho ionizace, je tím silnější, čím intenzivnější jsou paprsky vyzařované radioaktivními látkami. Kosmické paprsky postupují ohromnou rychlostí a mohou proto způsobit v atmosféře silné poruchy rozbíjením atomů prvků, z nichž se skládá vzduch. Působením radioaktivních a kosmických paprsků na vzduch podmiňuje v atmosféře nepřetržitou existenci mnoha tisíc kladných/ záporných částecek v každém krychlovém centimetru vzduchu.

#### 2.1.1.3 Ionizace vlivem pohybu vodních kapiček

Tato ionizace je způsobena pohybem vodních kapek a ledových částic. Vodní kapky při výstupu i pádu pomocí vzdušných vírů se zelektrizují **třením s molekulami vzduchu** (atmosférickými ionty). Kapky vody se s nabitými a již ionizovanými částicemi vzduchu s nimi spojují a pohlcují jejich náboj. Protože náboj ionizovaných molekul vzduchu vyvolá vlivem stálého elektrického pole Země elektrickou **polarizaci** blízkých neutrálních molekul, vznikají **elektrostatické síly**, jejichž působením dojde ke vzniku shluků zpravidla jedné ionizované molekuly a několika neutrálních molekul. Takový shluk pak může být zachycen na aerosolových částicích rozptýlených ve vzduchu, čímž vznikají elektricky nabitě částice podstatně větších rozměrů. Největší příspěvky elektrické vodivosti vzduchu mají malé a tudíž i pohyblivější, rychlejší a lehčí ionty. Bude-li lehký iont zachycen v aerosolových částicích vzduchu, ztěžkne a tím se jeho pohyblivost a tím i vodivost zmenší. Toto poznání je důležité, jelikož aerosolové částice mohou být tvořeny buď prachem, nebo pro nás důležitými vodními kapičkami, ledovými krystaly. To znamená, že v oblacích, mlze kde se ionty zachytávají, dochází ke snížení vodivosti.

Padající nabitě dešťové kapky pak zachytává vítr a prudkými **nárazy je rozbíjí na části**, čím vznikají separované náboje. Tyto náboje pak mohou vyvolat indukci opačných nábojů například u povrchu Země, kterou způsobí déšť, který z mraků odnáší část jeho elektřiny na zem a tak se mezi ním a zemí objevují elektrické náboje opačného smyslu, mezi nimiž vzniká elektrická přitažlivost. Celému principu se říká tzv. polarizační mechanismus, který má 2 již popsané složky (polarizaci a indukci nábojů).

#### 2.1.1.4 Ionizace vlivem radioaktivního záření

Tato ionizace je svou podstatou stejná, jako ionizace zářením kosmickým, s tím rozdílem, že toto záření působí od zemského povrchu a nikoliv z vesmíru. Má také ve srovnání se zářením kosmickým jen nepatrné příspěvky ionizace. V přízemních vrstvách v blízkosti zemského povrchu působí radioaktivní záření alfa, beta, gama. Toto záření vzniká při rozpadech přírodních i uměle vyrobených radionuklidů jako např. radium, thorium. Tato záření vysílají částice, které velkou rychlostí vnikají do atmosféry.

#### **2.1.1.5 Ionizace vyvolaná elektrickým výbojem (bleskem), převzato z [4]**

Při průchodu blesku vzduchem dochází podél jeho dráhy k ionizaci.

Tu způsobuje extrémně vysoká teplota v mraku (termická ionizace), při níž tepelná setrvačnost částic uchovává vodivý ionizovaný kanál v dráze bleskového výboje, a také výboje vlivem intenzivního elektrického proudu (primární ionizace). Dochází také k sekundární ionizaci, tedy k ionizaci záření (tvrdé UV záření), které blesk vyvolává. Ačkoliv každou sekundu proběhne v zemské atmosféře v průměru 117 výbojů, jejich přínos k celkové ionizaci je zanedbatelný, neboť celkový objem vzduchu, který může blesk ionizovat je velmi malý. Pro přiblížení blesk představuje tvar válce o délce cca 0,5 až 2 km, zohledníme-li i větvení kanálu o průměru, který činí řádově jen několik milimetrů až centimetrů.

### **2.1.2 Rozložení náboje v mraku**

V této části se seznámíme s typickou elektrickou strukturou bouřkového mraku. Je však nutno mít na paměti, že existují 2 druhy blesku (pozitivní, negativní), které budou rozebrány později. V této části se seznámíme s typickou strukturou bouřkových mračen, která se děje při výboji negativním (90-95% všech blesků). Princip pozitivního výboje je totožný, ovšem s rozdílem obrácené polaritý nábojů. Již známe elektrickou strukturu kapek ve spodní části mraku, pro pochopení celkového rozložení náboje v mraku se ale ještě musíme podívat, jak je to s rozložením náboje ledových částic, výše v mraku. Teorie o organizaci náboje v ledových částicích jsou celkem 2, ale mají společné výsledky.

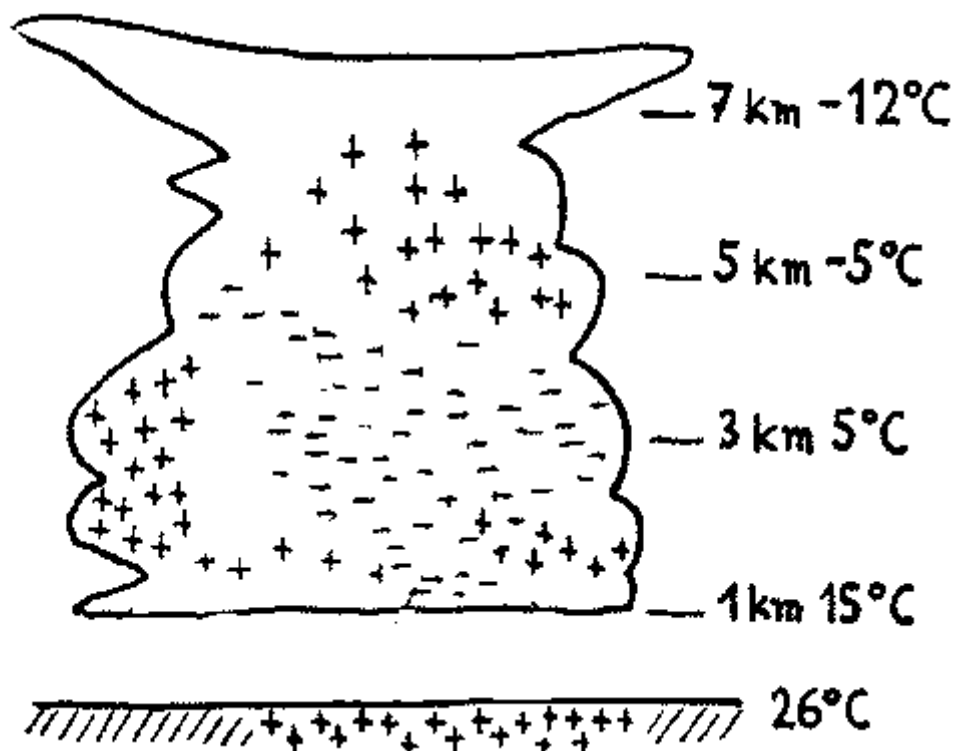
- První teorie je založena na vlastnostech při uvolňování tepla. V bouřkovém oblaku můžeme předpokládat, že velké ledové částice zachycují podstatně více přechlazených vodních kapiček. Proto se na svém povrchu více zahřívají uvolňováním tepla při jejich namrzání, než drobné ledové částičky. Při vzájemných nárazech se pak na okamžik dostává do kontaktu relativně teplejší povrch velkých ledových částic s chladnějším povrchem malých ledových krystalků, což způsobí, že velké elementy se nabíjejí záporně a malé kladně.
- Druhá teorie je pak založena na přítomnosti silných vzdušných proudů. Předpokládá se, že proces zachycování přechlazených vodních kapiček na povrchu ledových částic může být natolik intenzivní, že zachycená voda nestačí okamžitě zmrznout a led se tak obaluje vrstvou přechlazené vody. Pokud se na ledové podložce při teplotách nižších než 0 °C vytvoří vrstvička přechlazené vody, dochází k zápornému nabíjení ledu (jádra) a ke kladnému nabíjení přechlazené vody (obalu). Při srážce vzduchu s přechlazenou vodou pak mohou odstříkovat drobné kladně nabitě kapičky.

Z těchto teorií lze vyvodit, že větší, těžší ledové částice (nejčastěji kroupy) získávají záporný náboj. Zatímco menší a lehčí částice (sněhové vločky) dostávají náboj kladný. Nyní když už víme jak je to s náboji v horních i spodních částech mraku, můžeme si vysvětlit, co stojí za rozdělováním těchto nábojů do patřičných částí mraku. Je to **vítr** a **gravitační síly** (hmotnost kapiček, ledu). Jak již bylo zmíněno větší a tím pádem těžší částice díky gravitačním silám směřují k zemskému povrchu a naopak lehčí částice jsou vzdušnými proudy unášeny vzhůru. Díky těmto vlastnostem se nám situace vlastně dělí na 4 části (horní, střední a spodní část mraku, zemský povrch).

- Do **horní části mraku** se dostávají vzdušnými proudy lehké, kladně nabitě sněhové vločky. Díky tomu tvoří na vrcholu oblaku kladně nabitě centrum náboje.
- Do **střední/spodní části mraku** se propadávají těžší ledové částice (většinou kroupy), které nesou záporný náboj, kde se táním mění v kapky vody. Současně s nimi se zde dostávají opět za pomoci vzdušných proudů roztříštěné záporně nabitě kapičky vody. A tvoří tak záporné centrum.
- **Spodní část mraku** (podružné kladné centrum) se však vytváří pouze za určitých okolností a času v pokročilém stadiu vývoje bouřky v oblasti intenzivních vypadávání srážek. Podmínkou vzniku tohoto centra je, že základna oblaku musí ležet níže, než nulová izoterma. Při tání velkých padajících ledových částic vznikají pod hladinou nulové izotermie vodní kapky takových rozměrů, že blána povrchového napětí vody je neudrží pohromadě a dochází proto k jejich samovolnému rozpadání a pokračují v pádu jako dešťové kapky (kladné), a větší počet mikroskopických kapiček (záporné). Tímto způsobem kladně nabitě padající dešťové kapky se pak v základně oblaku mohou jevit jako určité centrum kladného náboje.
- K **zemskému povrchu** pak zbylé kapky (příp. kroupy, sníh) odvádí kladný náboj ve formě srážek (deště, sněžení, krupobití). A také indukci ze spodní záporné části mraků vzniká na zemském povrchu kladný náboj.

Vítr má však ještě další úlohy při formování struktury mraku. Čím silnější je vítr, tím rychleji se mrak nabíjí elektřinou (vlivem nárazy větru). Proud vzduchu mění v určité výšce svůj směr na vodorovný a přitom s sebou mohou unášet vrchní část oblaku stranou od jeho základní části. Výsledkem toho bude, že vzniknou oblaky nabitě převážně jedním druhem elektřiny (+/-).

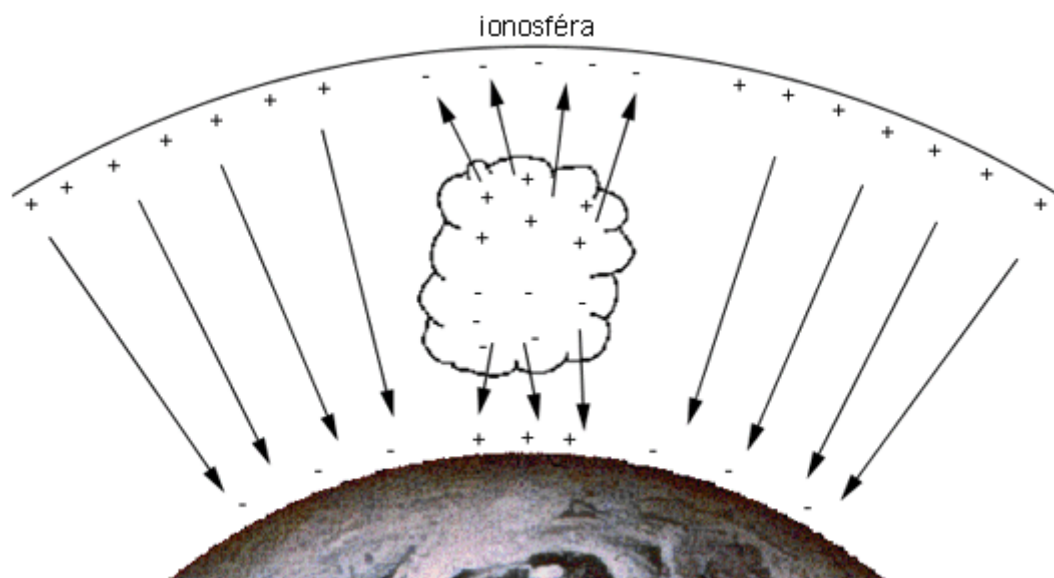
Celkové rozložení náboje v oblaku dle jeho výšky je tedy patrné z obr. 7



obr. 7 Rozložení náboje v mraku, převzato z [1]

## 2.2 Princip vzniku bouřkového výboje

Nyní když už známe nejčastější rozložení nábojů v bouřkovém mraku a víme, že tyto náboje indukují na zemském povrchu náboj opačného, stejně velkého náboje může si popsat, jak vzniká bouřkový výboj. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.1, vzduch je díky rostoucí výšce a působení kosmického záření stále vodivější. U zemského povrchu se vzduch chová jako dielektrikum, avšak ve výškách 50 – 60 km pak bývá vzduch již natolik elektricky vodivý, že vrstvy atmosféry nad touto výškou se někdy dokonce označují jako elektrosféra. Získáváme tedy 2 opačně nabité plochy, které jsou odděleny dielektrikem o výšce 60 až 100 km (ionosféra). Celý tento složitý útvar lze připodobnit k obrovskému kulovému kondenzátoru, jehož elektrody tvoří zemský povrch, elektrosféra (ionosféra), čili kondenzátor „Země-atmosféra“. Přičemž náboj atmosféry má kladné znaménko, a jím indukovaný náboj na zemském povrchu má znaménko záporné, aby bylo dodrženo pravidlo elektroneutality a předpokládá se také stejně velké množství náboje v absolutní hodnotě. Ukázka kondenzátoru „Země-atmosféra“ je na obr. 8.



**obr. 8 Kondenzátor „Země- ionosféra“, převzato z [11]**

Jak již ovšem víme, vodivost vzduchu je sice velmi malá, není však nulová, z toho plyne, že dochází k uzavření elektrického obvodu naším „kondenzátorem“ a tím pádem tečení elektrických proudů atmosférou. V atmosféře se tedy vytváří přibližně vertikálně orientované pole, jehož intenzita dosahuje za klidného ovzduší u zemského povrchu nejčastěji hodnot 130 – 140 V/m. Pod mohutnými, především bouřkovými oblaky však elektrická pole zesilují až na desítky tisíc V/m, mají ale opačnou polaritu. Jelikož kondenzátorem prochází proud, začíná se vybíjet a za pár minut by mohlo dojít k jeho úplnému vybití. Elektrické pole v ovzduší je však stále, takže musí někde existovat určitý nabíjecí mechanismus. Tímto mechanismem jsou bouřkové výboje (hrotové výboje, blesky), kdy dochází k dodání záporného náboje Země. Vybití takto nahromaděných elektrických nábojů (mraku-země) nastane skokem (výbojem, elektrickou jiskrou). Určitá vzdálenost, kterou musí výboj ve vzduchu překonat, vyžaduje vždy určitého nahromadění náboje. Pokud se tedy nahromadí na 2 blízkých místech velké množství kladných a záporných nábojů, jejich spojením se děje výbojem. Stále větší a větší vzdálenost 2 míst s nahromaděnými náboji potřebuje daleko větší a větší nahromadění nábojů, aby mohl nastat výboj. Aby byla překonána výbojem vzdálenost několika stovek metrů (z mraku do země) je zapotřebí ohromného spádu napětí, ke kterému dochází při přechodu bouřkových mraků.



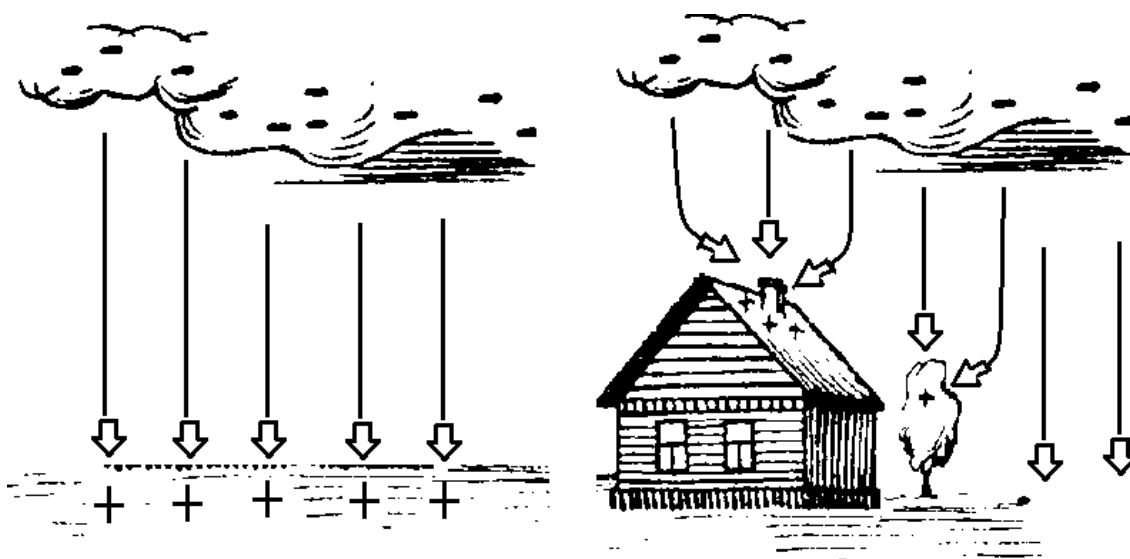
## 2.3 Rozdělení bouřkových výbojů

Bouřkové výboje jsou asi nejefektivnějším ze všech projevů bouřkové činnosti. Rozeznáváme celkem 2, tvoří je hrotový výboj a blesk, který se dále dělí podle jeho tvarů. V této kapitole si oba druhy přiblížíme. Popíšeme si, jak k jednotlivým výbojům dochází a jaké jsou mezi nimi rozdíly, dále poté popíšeme blesk a jeho další rozdělení, podle tvaru, druhu výboje, druhu náboje.

### 2.3.1 Hrotové (bodové) výboje

Jak již bylo zmíněno, v atmosféře dochází k toku elektrického proudu, čili pohybu iontů. Při odtržení elektronů z elektroneutrálních molekul (vlivem např. kosmického záření) dochází při srážce s dalšími neutrálními molekulami vzduchu k tomu, že se na nich zachytí, neboť nemají kinetickou energii postačující k tomu, aby při nárazu způsobily novou ionizaci. Tuto kinetickou energii mohou elektrony získat tak, že se budou nacházet v silném elektrickém poli, které se vytváří při přechodu oblaku nad daným místem. Vzniká proto, že se kolem našeho předmětu začnou zhušťovat elektrické siločáry, které směřují do předmětu jak je patrné z obr. 9. Při dodání takovéto energie může elektron v době mezi svým uvolněním z molekuly a první srážkou s další neutrální molekulou získat obrovskou rychlost. Při této rychlosti může způsobit, že neutrální molekulu, do které narazí, ionizuje (vyrazí z ní další elektron nárazem). Elektron uvolněný při nárazu z původně neutrální molekuly působí opět ionizací nárazem a počet iontů takto lavinovitě roste. Obdobně mohou působit i další elektricky nabitě částice, např. ionizované molekuly nebo jejich shluky, které však vzhledem ke své podstatně menší pohyblivosti mají ve srovnání s volnými elektrony v elektrickém poli poměrně slabou ionizační schopnost.

Na obrázku si vysvětlíme zhuštění siločar. Jak lze vidět, mezi mrakem (záporný) a zemí se indukci vyvolá u zemského povrchu náboj kladný. Pokud v okolí není žádný předmět, siločáry jsou rovnoběžné a vertikální viz obr. 9. Nyní při přidání velmi úzkého a špičatého (hrotového) předmětu, který je pevně spojen se zemským povrchem (uzemněn) a který má se zemí tudíž stejný potenciál (kladný), můžeme pozorovat, jak se elektrické siločáry začínají zhušťovat v okolí našeho předmětu, jak je patrné z obr. 9. Kladná elektřina, která se snaží přiblížit se k mraku, bude na zemi rozmístěna po povrchu všech vyvýšených, elektricky vodivých předmětů. Okolo zmíněného bodového vodiče (hrotu) se potom vytváří oblak iontů, z něhož jsou uzemněním odváděny k zemskému povrchu ty částice, jež nesou vzhledem k zemi náboje opačného znaménka.



obr. 9 Rozložení siloečar bez přítomnosti předmětu (vlevo), s předměty (vpravo)

V právě popsaném typickém případě je takto k zemskému povrchu přiváděn záporný náboj, který se po něm ihned rozestře, neboť povrch Země lze považovat za prakticky dokonale vodivou plochu.

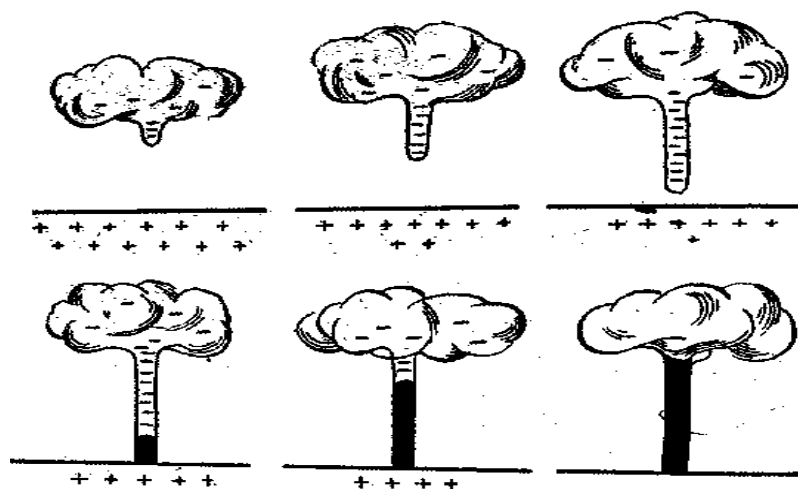
Čím vyšší je předmět, stojící na zemi, tím menší je vzdálenost mezi ním a mrakem, a tím tenčí je vrstva vzduchu, oddělující nestejné druhy elektriny. Je pochopitelné, že v takových místech (vrcholcích stromů, věží atd.) blesk nejsnadněji prorazí k zemi. Při dosažení určité kritické hodnoty intenzity elektrického, která je zhruba  $600-1000 \text{ V m}^{-1}$ , čili několikanásobek velikosti intenzity běžného elektrického pole v podmínkách klidného počasí. Dochází k proražení vrstvy vzduchu mezi oblakem a předmětem a nastává elektrický výboj. Silné hrotové výboje jsou provázeny i zvukovými efekty (praskáním) a zrakovými vjemy spočívajícími v jiskření a sršení různých kovových hrotů, špiček stožárů, věží apod. Tomuto jevu se říká **Eliášův oheň**.

### 2.3.2 Blesky

Rozdíl mezi bleskem a hrotovým výbojem je v tom, že hrotový výboj, který probíhá v okolí špiček, hrotů vysoce postavených předmětů má pouze omezený objem vzduchu. V případě blesku jde o elektrický výboj doprovázený vysokou ionizací vzduchu ve značném prostorovém rozsahu a nemusí být veden do hrotů nebo špiček, ale může udeřit i do země. Blesk se sestává z 2 částí (vůdčí /předběžný výboj, hlavní výboj), které si vysvětlíme.

### 2.3.2.1 Vůdčí výboj (leader)

Vytvoří opticky patrný kanál vysoce ionizovaného a zahřátého vzduchu, jímž pak po určitý časový interval protéká elektrický proud. Z počátku se směrem k zemi pohybuje úzkým kanálem malé množství elektronů, které tvoří ve vzduchu jakýsi potůček. V místě největšího nahromadění nábojů na spodním okraji mraku dosahují elektrony díky vysoké intenzitě elektrického pole takové rychlosti, že silně ionizují vzduch. Záporné elektrony se totiž odtrhují od atomových jader a jádra zůstávají kladně nabitá. Tento počáteční pochod se stále urychluje a uvolňuje se lavinovitě stále větší a větší množství záporných elektronů, působících ve směru k zemi. Vzduch zasažený tímto pochodem se prudce zahřívá a z nevodivého vzduchu se stává vodivý. V této fázi začne lavina elektronů rychlostí přes 90 km/s klikatě sestupovat z mraku k povrchu země, přičemž vyhledává cestu nejmenšího odporu, tedy nejvodivější cestu. Tyto skoky se vysvětlují tím, že na jeho dráze dochází k poklesu gradientu potenciálu pod určitou kritickou hodnotu a pohyb výboje se pak na několik mikrosekund až milisekund zastavuje. Při tomto zastavení intenzita elektrického pole znovu vzroste. Obvykle se tento proud elektronů cestou rozdělí na dva. Po určité chvíli se i tyto dva proudy rozdělí, až vznikne typická blesková "vidlice". Elektrony na zemském povrchu jsou odpuzovány elektrony z oblohy a tak intenzita pozitivního náboje země sílí. A tak se vytvoří proud kladných nábojů, který se snaží spojit s lavinou elektronů a začne stoupat ze Země směrem k mraku (většinou od vysoce postavených předmětů). Ve výšce několika stovek metrů se oba proudy setkají. Tím dojde k uzavření elektrického obvodu a také vytvoření vodivého kanálu, který spojuje oblak se zemí. Jak je patrné z obr. 10.



obr. 10 Princip blesku: vůdčí výboj (horní 3 obrázky), hlavní, převzato z [2]

### 2.3.2.2 Hlavní (zpětný) výboj

Při vytvoření kanálu mezi mezí a mrakem, jehož průměr většinou dosahuje hodnot milimetrů až centimetrů, dochází k uzavření elektrického obvodu. V tuto chvíli prorazil předběžný kanál cestu **hlavnímu výboji**. Ve vodivém kanálu nastane spojení záporné elektřiny, nahromaděné v kanálu, a kladné elektřiny, která se dostala na zem s kapkami deště a elektrickou indukcí. V tuto chvíli se v čase menším než 1 milisekunda na zem dostává ohromné množství elektronů rychlostí až 80 000 km/s. Tím vzniká výboj, což je ve skutečnosti tok proudu ohromné intenzity. Výboj trvá jen zlomek vteřiny, a proto je elektrická energie, vznikající při výboji, poměrně malá. Při průchodu nábojů v důsledku ionizace a zahřívání vzduch svítí, vidíme blesk. Máme pocit, že míří k zemi, protože náboj kopíruje sestupnou trasu proudu rozděleného do vidlice. Po cestě, proražené prvním výbojem, se okamžitě vrhne nový předběžný výboj, a za ním po stejné cestě následuje znovu hlavní část výboje. Takových jednotlivých výbojů, z nich každý se skládá z předběžného výboje a hlavní části, může být až 50. Nejčastěji vznikají dva až tři. Impulzy blesku se vlévají do neviditelného kanálu proraženého prvním impulsem. Mezi dvěma za sebou následujícími zákmity blesku stačí jeho stopa pohasnout a znovu se rozsvítí při následujícím impulsu. Avšak pokaždé v čase padesátiny sekundy, takže člověk jednotlivé záblesky nerozlišuje. To je příčina kmitání blesku. Tato situace je zobrazena na obr. 10.

### 2.3.3 Rozdělení blesků

Blesky můžeme dělit do několika kategorií. Lze je rozdělit podle míst, odkud a kam blesk udeří, na blesky **uvnitř jednoho mraku** (mezi horní a dolní částí jednoho mraku, IC) a blesk **mezi dvěma blízkými oblaky** (CC), přičemž délka při tomto druhu blesku může přesáhnout 50 km. A poté na blesk **mezi mrakem a zemí** na blesk země-mrak (GC), mrak-země (CG), které mohou být dle náboje buď pozitivní, nebo negativní, jejichž délka se pohybuje kolem 2 až 3 km. Celkem tedy máme 4 druhy blesků mezi vzduchem a zemí, jsou to (CG+,CG-,GC+,GC-). Zkratka C znamená Cloud (oblak), a G Ground (země). Další dělení je dle tvaru blesků na čárový, rozvětvený, plošný, perlový, stuhový a kulový.

Pokud bychom měli tyto kategorie uspořádat, vypadaly by takto:

**mezi dvěma blízkými oblaky** (CC) = čárový, plošný, rozvětvený

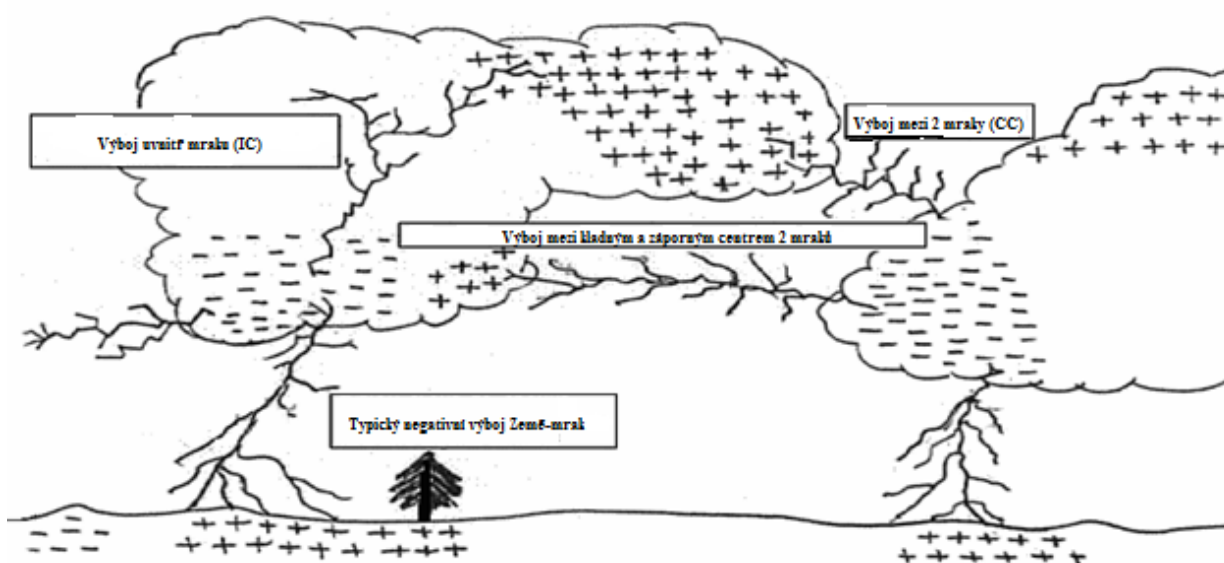
**uvnitř jednoho mraku** (vnitřní, IC = Intra Cloud) = plošný

**mezi mrakem a zemí** (CG+/-,GC+/-) = čárový, rozvětvený, stuhový, perlový

Ukázka těchto výbojů je na obr. 11.

- Jako první si probereme rozdíl mezi **kladným** a **záporným** výbojem, poté rozdíl mezi blesky **mrak-země**, **země-mrak** a na to již blesky budeme blesky dělit pouze dle jejich tvarů.
- Rozdíl mezi **kladným** a **záporným** výbojem spočívá v tom, zda je dolní centrum oblaku nabit kladně, nebo záporně. Toto nabití záleží na počátečním stavu náboje mraku a působení přitažlivých sil. Pokud budou na vrcholku mraku kladné ionty, přitáhnou záporné ionty z atmosféry. Záporné ionty se naváží na vodu nebo ledové částičky v mraku a klesnou do jeho spodní části (záporný výboj). Tady se nahromadí, až vybudují elektrické pole. Jeho působením se kladné ionty "odeženou" do horní části mraku, kde přitáhnou další záporné ionty a postup se znovu opakuje. Pokud by totiž celý proces v mraku začal ve chvíli, kdy má mrak na vrcholku záporný náboj, bylo by vše obráceně a vzniknul by kladný výboj.
- **Záporný blesk** Tvoří 90- 95% všech výbojů mezi vzduchem a zemí. Jedná se o klasický blesk, který se nachází v oblasti vypadávajících srážek. Výboj trvá cca 1/4 sekundy, proud 30 kA, náboj 5 C, napětí 100 MV.
- **Kladný blesk** může udeřit i 25 km od bouře. Nejčastěji se vyskytuje v zimních bouřích a na konci bouřek. Je 6 – 10x silnější než negativní blesky a trvá 10x déle. Vzniká u nich velké množství rádiových vln o extrémně nízké frekvenci a je považován za možnou příčinu mnoha lesních požárů. Trvá desetiny milisekund, proud 300 kA, náboj do 300 C, napětí 1 GV.
- U výbojů **mrak-země** máme 2 druhy tohoto blesku negativní/pozitivní, který začíná v mraku a směrem k zemi přenáší záporný/kladný náboj. Tomuto blesku se říká sestupný.
- U výbojů **země-mrak** se přenáší záporný/kladný náboj naopak od země vzhůru k oblaku, tomuto blesku se říká blesk vzestupný.

Další popisy blesků jsou děleny už jen podle jejich vzhledu a tvaru.



obr. 11 Ukázka IC, CC, CG výbojů, převzato z [10]

#### 2.3.3.1 Blesk čárový

Pravděpodobně nejrozšířenějším je čárový blesk, který má tvar jednoduché klikaté, jasně svítící jediné čáry bez větvení. Tato čára je dráhou elektronů, pohybujících se rychlostí 30 000 km/s. Je to dlouhý elektrický výboj (**mezi mrakem a zemí** nebo **mezi dvěma mraky**). Mezi mraky je až 3x častější. Blesk bývá barvy bílé, ale také modré, červené.

#### 2.3.3.2 Blesk rozvětvený

Jedná se v podstatě o blesk čárový, s tím rozdílem, že blesk netvoří pouze jedna jediná čára, ale je u něj pozorováno bohaté větvení kanálu. Přičemž optická intenzita rozvětvených dílčích kanálů směrem od hlavního kanálu obvykle slábne. Ramena větví končí většinou v atmosféře – pouze pět procent z nich se dotkne země. Jeho pustošící schopnosti jsou poměrně značné, neboť díky několika kanálům je jeho nebezpečnost větší a ani bleskosvod nedokáže před tímto typem blesku účinně chránit. Jeho vývoj je detailně popsán v kapitole 2.3.2

#### 2.3.3.3 Blesk plošný (blýskavice)

Hlavním znakem plošného blesku jsou ostře rýsující se obrysy mraků. Z fyzikálního hlediska je náboj mezi mraky nedostatečný k vytvoření blesku čárového, takže vznikne jen doutnavý výboj, u něhož není viditelný kanál ionizovaného vzduchu, a pozorujeme pouze náhlé rozsvícení bouřkového mraku. Můžeme pak pozorovat bělavý záblesk, trvající zlomky sekundy, který prozáří kontury mraku. Tyto výboje se pak velmi často opakují. Oproti čárovému blesku neuslyšíte zahřmění, to je způsobeno právě nedostatkem náboje. Plošný blesk v jednom mraku je mnohem vzácnější, než mezi 2 mraky.

#### 2.3.3.4 Blesk perlový (čočkový, růžencový)

Jedná se o blesk s opticky přerušovaným kanálem. Většinou vzniká na dráze, po které předtím prošel již čárový blesk s velkou šířkou kanálu, která způsobuje, že blesk po určité chvíli ještě svítí. Po ukončení čárového výboje se výbojový kanál blesku rozpadne na jednotlivé kuličky vzdálené 7 – 12 m, které jsou rozmístěny na jedné čáře. Dochází k tomu zřejmě působením silného elektromagnetického pole, které doslova zaškrtní bleskový kanál na několik samostatných útvarů. Někdy se jeví jako by jednotlivé kuličky postupně vybuchovaly a mizely poměrně zvolna výbuchem jednoho za druhým. Doprovázen značným zvukovým efektem. Jde o velmi vzácný jev a neexistuje ani hodnověrná fotografie tohoto útvaru. Na obloze vydrží nejdéle ze všech typů blesků a zahlédnout ho můžete při silném dešti.

#### 2.3.3.5 Blesk stuhový

Blesk vyskytující se řídce, s výrazně širším opticky patrným kanálem, což bývá vysvětlováno ovlivněním kanálu silným větrem. Skládá se z několika za sebou následujících výbojů, které jsou navzájem rovnoběžné. Vlastní elektrický výboj v tomto případě probíhá uprostřed slabšího jiskření. Dráha průběhu tohoto výboje se podobá rozvinuté stuze a podle toho také dostal svůj název. Čím silnější je vítr a čím blíže je úder blesku, tím větší bývá zachycený vodorovný posun na fotografických snímcích. Stuhový blesk je nebezpečný tím, že může najednou způsobit několik požárů.

#### 2.3.3.6 Kulový blesk

Vzácným jevem vyskytujícím se při bouřkách je **kulový blesk**. Mívá sférický tvar o průměru od několika centimetrů až po několik metrů (v extrémních případech), projevuje se světélkováním v různých barvách, volně se vznáší ve vzduchu nebo klesá shora dolů. Jeho trvání bývá často velmi dlouhé (desítky sekund až minuty). Někdy mizí explozí, jindy se zcela tiše rozplyne, vniká do budov nejčastěji komíny nebo okny a má destruktivní účinky, při dotyku vznikají popáleniny. Princip kulového blesku nebyl dosud vysvětlen.

#### 2.3.3.7 Eliášův oheň

I když se nejedná o blesk, ale projev hrotového výboje je jedním z příznaků bouřky. Jedná se o sršení v tenkých kovových předmětech na jejich hrotech. Při velmi silné intenzitě elektrického pole můžeme pozorovat, jak špičky předmětů modře svítí. Tento název vznikl dle patrona námořníků Svatého Eliáše, jelikož byl tento jev na špičkách lodí pozorován nejčastěji.

### 2.4 Způsoby indikace (detekce) blesků

V této kapitole si probereme různé možnosti zaznamenání blesků a určení jejich parametrů. Pro registraci bouřek lze použít 2 metody.

- První metodou je metoda **statická**, která je založena na pozorování růstu napětí elektrického pole v atmosféře. Jelikož víme, že v klidné počasí se toto napětí pohybuje kolem 100 V/m a roste v blízkosti se bouří až k hodnotám 1-40 kV/m. Tato metoda však slouží jen k detekci bouřek nikoliv blesků, proto se touto metodou zabývat nebudeme.
- Druhá je metoda **elektromagnetická**, tato metoda je založena na zachycení rádiových vln, které způsobí bleskový výboj. Proto si ji rozebereme.

**Odstavec převzat z [5].** Při výboji blesku dochází ke vzniku tzv. **atmosferiků**, tj. vyzáření značného množství elektromagnetické energie v širokém frekvenčním spektru. Toto vyzáření je vyvoláno pohybem elektrického náboje v kanálu blesku. Vzhledem k tomu, že změny rychlosti tohoto pohybu nevykazují pravidelné periody, obsahují široký rozsah frekvencí.

Při zpětném výboji blesku do země je nejvíce energie vyzářeno na nízkých frekvencích v oblasti velmi dlouhých a dlouhých vln (jednotky až stovky kHz).

Uvnitř oblaků generují vůdčí i zpětné výboje blesků záření především na výrazně vyšších frekvencích v oblasti VKV (rádu stovek MHz). Proto blesky můžeme slyšet jako rušení v rozhlasovém přijímači, eventuálně jako hvizd.

Hvizdové vlny dostaly své pojmenování dle hvízdavého zvuku, který vzniká rozdílnou disperzí pro různé kmitočty. Hvizdové vlny vyvolané bleskovým výbojem částečně pronikají ionosférou a šíří se ve vnitřní magnetosféře, proto hovoříme o tzv. **magnetosféricky odrážených hvizdech**. Tyto vlny extrémně nízkých kmitočtů šířících mezi ionosférou a zemským povrchem jsou jen velmi málo tlumeny, proto se mohou šířit až několikrát kolem Země. K detekci blesků se používají 2 metody (pozemní, družicové) a k zachycení atmosfériků slouží 2 metody (ToA,DF).

## 2.4.1 Pozemní detekce

Princip této detekce je založen na přijímání a vyhodnocení části spektra elektromagnetické energie generované bleskem. K tomu se používají čidla, které detekují polohu bleskových výbojů pomocí triangulace. Z důvodu triangulace je však k určení polohy nutné použití víc čidel (nejméně 3), většinou se však vytváří tzv. detekční síť, kterou tvoří větší množství detekčních čidel vzdálených od sebe desítky až stovky kilometrů. Čidla jsou přesně časově synchronizována, nejčastěji pomocí přijímače signálu GPS, a v reálném čase propojena s centrálním zpracovatelským serverem. Ten na základě dat ze senzorů vypočte čas, polohu, typ, špičkovou hodnotu proudu ve výboji (v kA), případně polaritu bleskového výboje. Tyto informace jsou poté k dispozici i veřejnosti. Příkladem takové detekční sítě v ČR je CELDN (Central European Lightning Detection Network), která je částí sítě EUCLID a provozuje v současné době 140 detektorů, které dodávají údaje do datového centra.

Triangulační metody vyhodnocení polohy výboje blesku jsou dvě.



➤ Metoda času příchodu (time of arrival - TOA)

Tato metoda je založena na skutečnosti, že rychlost šíření elektromagnetického signálu je přibližně konstantní. Z toho důvodu je porovnáván přesný čas zaznamenání signálu anténou čidla. Poloha zdroje signálu je dána průsečíkem jednotlivých hyperbolických křivek představujících pevný poměr časových rozdílů zaznamenání výboje na detekčních čidlech viz obr. 12. K vyhodnocení polohy je zapotřebí detekovat signál blesku alespoň třemi čidly současně. Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem lze určit podle vztahu:  $d = \frac{c}{t}$ ,

kde  $d$  [m] je vzdálenost mezi vysílači a přijímací anténou,

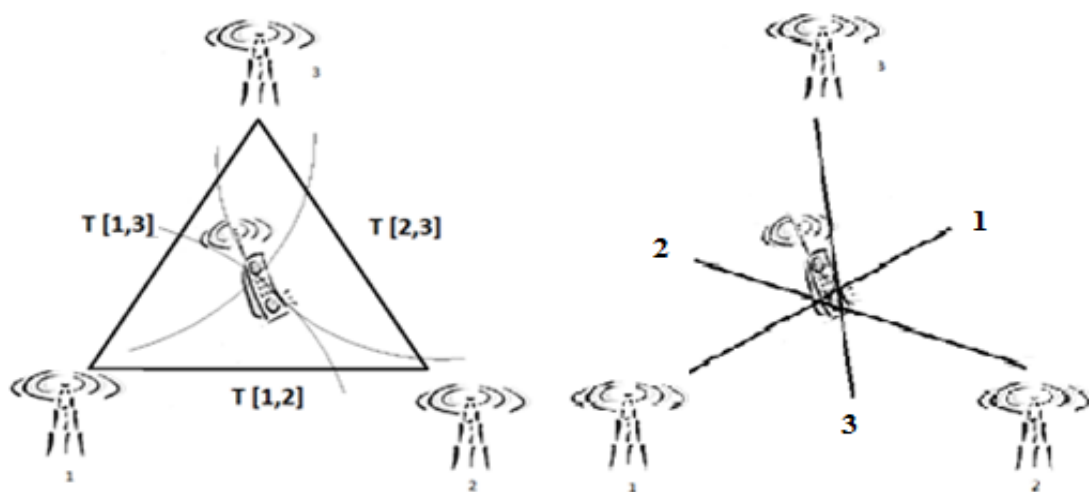
$c$  [m/s] je rychlost šíření elektromagnetického záření vakuu,  $3 \times 10^8$  m/s,

$t$  [s] je tranzitní čas signálu.

➤ Metoda určování směru (direction finding – DF)

Při metodě určování směru musí být navíc anténou detekčního čidla vyhodnocen i směr signálu. Poloha zdroje signálu je určena průsečíkem jeho směrů vyhodnocených na více čidlech (obráz. 12). K určení polohy při této metodě je teoreticky dostačující detekce signálu na dvou čidlech. Pokud však dojde k výboji poblíž přímky spojující tato dvě čidla, výrazně se zvyšuje chyba určení polohy, je proto vhodné využít k detekci alespoň tři čidla.

Při použití obou metod se výrazně zvyšuje přesnost určení polohy až na 500 m.



obr. 12 Princip metody ToA (vlevo), DF (vpravo) , převzato z [3]

Největší přesnost lokalizace i pravděpodobnost detekování výboje se dosahuje uvnitř detekční sítě (u obou metod), s rostoucí vzdáleností mezi detekčními čidly však klesá. Stejně jako na hranicích a vně detekční sítě. Kromě detekční sítě existují i samotná čidla, která měří směr výboje, vzdálenost je odhadována ze síly signálu. Ty však nemají přesnost jako detekční síť.

Ať už se jedná o detekční síť, nebo samostatný detektor, mohou čidla pracovat v různých frekvenčních oblastech. Proto je můžeme rozdělit na 2 skupiny.

#### **2.4.1.1 Čidla pracují na velmi dlouhých, dlouhých vlnách**

Při zpětném výboji mezi bleskem a zemí (CG, GC) je vyzářeno nejvíce energie právě na této vlnové délce. Energie této vlnové délky je vyzařována i při silných výbojích mezi oblaky (IC, CC). Z tohoto důvodu univerzálnosti při detekování různých typů výbojů, patří detektory na tomto principu k nejpoužívanějším. Další jejich výhodou je, že při této vlnové délce se jejich vlny ohýbají v atmosféře a díky tomu se šíří téměř rovnoběžně se zemským povrchem a tím se zvyšuje vzdálenost, na kterou jsou zaznamenatelné na zemském povrchu. Díky této vlastnosti vln mohou vzdálenosti mezi jednotlivými čidly detekční sítě dosahovat vzdáleností 200-300 km. Proto je nejvýhodnější použití v detekčních sítích pokrývajících velká území o rozloze států až kontinentů. Jak již bylo zmíněno, tyto systémy jsou tedy schopny detekovat jak blesky do země (pravděpodobnosti detekce kolem 90%), tak i část mezioblačných výbojů (přibližně 5-30 %). Rozlišení mezioblačných blesků a blesků do země se provádí vyhodnocením tvaru časového průběhu detekovaného záření.

#### **2.4.1.2 Velmi krátké vlny**

U těchto vlnových délek se nevyzařuje tolik energie, jako u dlouhých vln. Princip šíření vln je také odlišný, na rozdíl od velmi dlouhých, dlouhých vln se tyto vlny od ionosféry neodráží, proto je nutné, aby čidla byla v přímé viditelnosti s bleskem. Jelikož je vyzařovaná energie menší, pro dosažení podobné pravděpodobnosti jako u čidel dlouhých vln musí být vzdálenost mezi jednotlivými detektory menší. Při vzdálenostech řádově desítek kilometrů je pak pravděpodobnost detekce kolem 90%. Proto jsou vhodné pro monitorování malých oblastí, např. zabezpečení provozu letišť, kosmodromů apod. Tyto systémy detekují jednotlivé postupné vůdčí výboje blesků do země i uvnitř oblačnosti. Rozlišení blesků do země a mezioblačných výbojů je obtížné a většinou se k tomu u těchto systémů využívá dodatečné čidlo pracující na dlouhých vlnách. Slabší výboje detekované systémy na VKV jsou většinou zaznamenány dříve než silnější výboje detekovatelné na dlouhých, lze je tedy teoreticky využít jako prediktory silné konvekce

### **2.4.2 Detekce pomocí družic**

Dalším způsobem detekce bleskových výbojů je pomocí družic, které obíhají kolem Země ve výškách kolem stovek kilometrů. Pomocí těchto družic můžeme bleskovou aktivitu kontrolovat opět 2 způsoby.

#### **2.4.2.1 Optická detekce [3,10]**

Blesky byly pozorovány z oběžné dráhy Země automatickými družicemi i posádkami pilotovaných kosmických letů. Pozorování z raketoplánů zároveň odhalila a zdokumentovala celou novou kategorii výbojů generovaných konvekčními bouřemi. Označují se jako sprites, blue jets a ELVES., vyskytují se nad konvekčními bouřemi a zasahují desítky kilometrů od stratosféry.

Jedním z nejvýznamnějších přístrojů pro optickou detekci výbojů z oběžné dráhy je přístroj LIS (Lightning Imaging Sensor), umístěný na družici TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). LIS nepřetržitě monitoruje území o velikosti 600x600 km, což v kombinaci s nízkou oběžnou dráhou (kolem 400 km) znamená souvislé pozorování určitého území pro dobu přibližně 90 sekund během přeletu družice nad danou lokalitou. To by se sice mohlo zdát málo, nicméně je to již dostatečně dlouhá doba na stanovení základních charakteristik – frekvence blesků (počet blesků za sekundu), jejich lokalizaci (s rozlišením 4 až 7 km) a stanovení jejich zářivé energie. Přístroj pracuje v nočních i denních hodinách, principem je rychlé odečítání hodnoty „pozadí“ od momentálních, rychle se měnících hodnot, což umožňuje detekci i relativně slabších záblesků. Efektivita detekce blesků do země je u tohoto přístroje přibližně 45%, u mezioblačných výbojů o něco vyšší.

#### **2.4.2.2 Detekce založená na VKV frekvenci [3,10]**

Výboje byly registrovány nejen v opticky, ale i v oblasti rádiových vln. Experimenty při testování potvrdili poměrnou spolehlivost VKV detekce z vesmíru, proto v současnosti probíhají studie možnosti využít VKV systémy detekce na družicích GPS, popř. družicích geostacionárních.

Systémy detekce blesků umístěné na oběžných drahách mají na jednu stranu výhodu v globálnosti svých měření, na druhou stranu nemohou pozemním systémům konkurovat z hlediska přesnosti lokalizace.

## 3 NÁVRH VLASTNÍHO DETEKTORU

Nyní se dostáváme k samotnému návrhu našeho indikátoru bouřek. Postupně si rozebereme požadavky a parametry, které očekáváme od našeho zařízení. Bude to zvolení kmitočtu, na kterém budeme přijímat. Definování základních požadavků a posléze vytvoření blokového schématu. Tím bude ukončena tato teoretická část a vše bude připraveno k realizaci.

### 3.1 Využití volných kmitočtů pro pasivní příjem

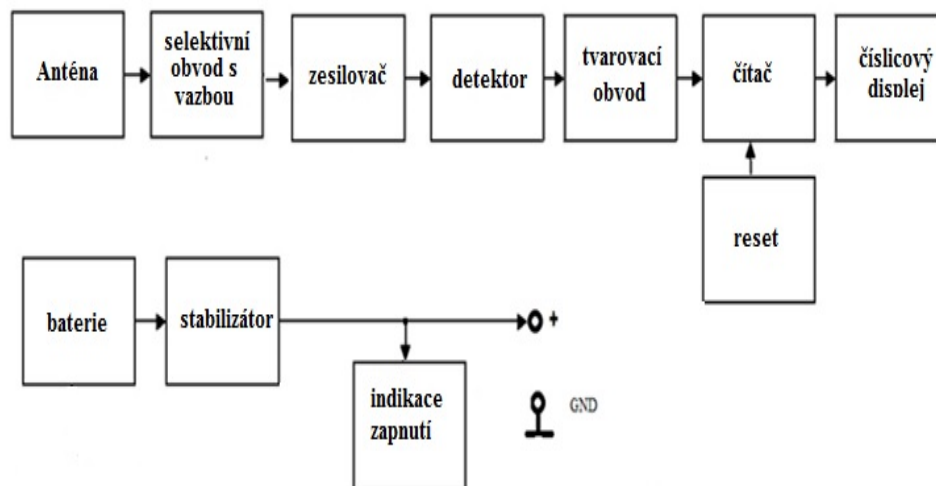
V této části se pokusíme najít vhodnou frekvenci pro zachycení signálu, který vyvolá bleskový výboj. Nyní když už víme, že blesková aktivita dosahuje nejčastěji frekvencí velmi dlouhých, dlouhých vln nebo případně velmi krátkých vln, můžeme pokračovat při návrhu našeho indikátoru bouřek. Naší hlavní prioritou v této kapitole bude najít jisté volné frekvenční pásmo v námi zvoleném rozsahu, abychom na něm mohli přijímat signály z bleskové aktivity. Pro naše aktivity stačí pouze příjem signálu, což naše hledání zjednodušuje, jelikož nebudeme rušit vysíláním jiné stanice.

Jelikož je blesková aktivita nejvýraznější na kmitočtech kolem 300 kHz, zaměříme naše hledání tímto směrem. Volná kmitočtová pásma pro Českou republiku jsou zveřejněna na stránkách Českého telekomunikačního úřadu, kde se také pokusíme najít volné pásmo v tomto okolí. **Převzato z [12]**

Při zkoumání rozdělení kmitočtů bylo volné pásmo 285-325 kHz, které je vyhrazeno námořní radionavigační službě, na které se nedá předpokládat aktivita v České republice. Proto náš kmitočet bude v tomto volném pásmu a bude naladěn pevně na 300 kHz, jelikož statické výboje související s blesky jsou na těchto frekvencích výrazné a pravděpodobnost rušení jinými službami je mizivá. Jelikož jde o dlouhé vlny, budeme moct indikovat jak blesk do země, tak i blesky mezi mraky, což je pro nás výhodné, abychom měli přehled o celkové bouřkové aktivitě. Po doplnění o čítač impulsů je možné ve své podstatě počítat blesky a udělat si tak obrázek o tom, jak byla bouře elektricky činná.

### 3.2 Návrh blokového schématu

Cílem této kapitoly je sestavení blokového schématu našeho detektoru bouřek, základem toho schématu je blokové schéma rádiového přijímače doplněného o bloky baterie a jejích dalších dílčích částí. Schéma je navrženo viz obr. 13.



obr. 13 Blokové schéma detektoru bouřek

### 3.3 Definice parametrů dílčích bloků

Pro zařízení se předpokládá bateriově napájené zařízení, a proto by mělo mít nízkou spotřebu, aby baterie s danou kapacitou vydržela napájet toto zařízení co nejdéle. Dalším požadavkem je přenositelnost zařízení

- **Anténa:** Všesměrová, detekce signálu v blízkém okolí zařízení, účinnost.
- **Selektivní obvod s vazbou:** Selektivita, citlivost, stabilita.
- **Zesilovač:** Širokopásmový, mezní kmitočet, šířka přenášeného pásma.
- **Detektor:** Amplitudový detektor dovolující i detekci slabých signálů. Vhodný by byl i operační usměrňovač
- **Tvarovací obvod:** Zpracování signálu z detektoru a požadované impulzy, nízký útlum. Úkolem tohoto obvodu je vytvořit z detekovaného signálu impulzy, které budou čítány čítačem.
- **Čítač:** Nízký příkon, kompatibilita TTL. Jedná se o dekadický čítač. Rozborem dostupných dat je nutno stanovit (i s přihlédnutím k délce sledování signálu), kolik míst bude mít tento čítač.
- **Reset:** Nulování čítače, použití tlačítka.
- **Číslicový displej:** Nízká spotřeba, 7-segmentový.
- **Stabilizátor:** Prvek s nízkým úbytkem napětí a malou vlastní spotřebou.
- **Indikace zapnutí:** Nízký příkon, LED dioda
- **Baterie:** Samovybíjení, její kapacita bude stanovena s ohledem na požadovanou délku provozu zařízení. Na požadovanou kapacitu bude mít vliv spotřeba zařízení a požadovaná provozní doba.

### 3.4 Popis jednotlivých bloků

V této kapitole si detailně probereme jednotlivé bloky z blokového schématu, seznámíme se s jejich zapojením, funkcí, probereme postupy a výpočty jednotlivých částí. Tato kapitola bude sloužit k objasnění volby zapojení a přiblížení k detailům jednotlivých částí. Celé schéma zapojení je v příloze č.2.

### 3.4.1 Anténa

Jako nejvhodnější typ antény jsem zvolil tzv. prutovou anténu, která je nejjednodušší na výrobu a naladění, mezi její výhody patří také nesměrovost. Její nevýhodou je nutnost přeladění při změně pásma, která nám však vymizí, jelikož máme pouze 1 kmitočet, na kterém chceme přijímat. Další její nevýhodou je malý zisk, což je při takto jednoduchém zapojení antény očekávatelné. První věc, kterou při výpočtu antén musíme zjistit, je vlnová délka, která je dle naší požadované frekvence:

#### ( 1) Výpočet vlnové délky

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300\,000\,000}{300\,000} = 1000m \quad [m, \frac{m}{s}, Hz] ; v - \text{rychlost světla}$$

Pro délku antény se používají násobky  $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ .. vlnových délek. Nejčastěji však prvních 2 zmíněných. Kdybychom si vybrali anténu délky  $\frac{1}{4}\lambda$  vyšla by nám délka antény rovná 250 m, což je extrémně velká hodnota, proto do obvodu přidáme ještě tzv. prodlužovací cívku, která má za úkol anténu elektricky prodloužit. Výpočet probíhá následovně, musíme určit vlnový odpor ze známých parametrů antény, zvolil jsem délku antény  $h=0,55$  metrů a tloušťku drátu  $d=3,75$  mm. Délka antény byla volena tak, aby hodnota prodlužovací cívky byla přibližně ve vyráběné řadě cívek (tlumivek) a byla přenositelná. Vlnový odpor je dle:

#### ( 2) Výpočet vlnového odporu

$$Z_0 = 60 \left[ \ln \left( \frac{h}{d} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot h}{\lambda} \right) - 1 \right] = 60 \left[ \ln \left( \frac{550}{3,75} \right) - \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot 0,55}{1000} \right) - 1 \right] = 443 \Omega.$$

Hodnotu potřebné indukčnosti prodlužovací cívky vypočítáme dle:

#### ( 3) Indukčnost prodlužovací cívky

$$L_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Z_0}{f} \cdot \cot g \left( 360 \cdot \frac{h}{\lambda} \right) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{239}{0,3 \text{ Mhz}} \cdot \cot g \left( 360 \cdot \frac{0,55}{1000} \right) \cong 2,7 \text{ mH}.$$

Hodnota cívky 2,7 mH nám tedy anténu elektricky prodlouží o:

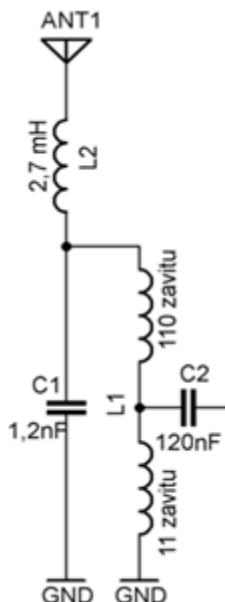
#### ( 4) Výpočet délky prodloužení

$$x_0 = \frac{\lambda}{4} - h = \frac{1000}{4} - 0,6 = 249,4 \text{ m}$$

Při rešerši literatury zabývající se těmito jednoduchými přijímači jsem zjistil, že je tento typ antén velmi využíván a dokáže zajistit detekci blesku v blízkosti zařízení. Přitom bude celé zařízení přenositelné. Tento typ antén je v takových zařízeních používán především pro jeho jednoduchost, možnosti výroby antény.

### 3.4.2 Laděný obvod s indukční vazbou

Z antény pokračuje námi zachycený signál z bleskového výboje na rezonanční obvod s cívkou L1 a kondenzátorem C1. Hodnoty těchto součástek byly vypočítány dle Thompsonova vztahu pro výpočet rezonančního kmitočtu, který je námi zvolených 300 kHz.



obr. 14 Laděný obvod s indukční vazbou

Cívka 2,7 mH zařazená v sérii s anténou pomáhá k přizpůsobení krátké antény na mnohem větší vlnovou délku a zvýšení účinnosti antény.

Výpočet součástek probíhal následovně. Nejprve jsme díky známému zvolenému kmitočtu znali rezonanční frekvenci, poté jsme museli zvolit hodnotu jedné ze součástek. Zvolil jsem hodnotu kondenzátoru z řady E6 a to 1,2 nF. Volba této hodnoty spočívá v požadavku zvýšení činitele jakosti rezonančního obvodu Q, jehož výpočet bude probrán po dopočítání indukčnosti.

Nyní lze dopočítat hodnotu cívky vyjádřením z Thompsonova vztahu, který je:

( 5 ) Thompsonův vztah

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad [Hz; H, F]$$

Po vyjádření indukčnosti L z rovnice dostáváme vztah:

( 6 ) Vyjádření indukčnosti z Thompsonova vztahu

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot C}$$

Nyní dosadíme námi zvolené hodnoty a vyjde nám indukčnost:

### ( 7) Výpočet indukčnosti

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-9}} = 234,53 \mu H$$

Jelikož nejbližší hodnota ve výrobní řadě cívek (tlumivek) je 220  $\mu H$ , bude výsledný kmitočet naladěn na frekvenci o něco vyšší přesněji na frekvenci:

### ( 8) Kmitočet při cívce 220 uH

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{1,2 \cdot 10^{-9} \cdot 220 \cdot 10^{-6}}} = 309,754 kHz$$

Odchylka od naší přijímací frekvence 300 kHz je při použití cívky s hodnotou 220  $\mu H$  přibližně 10 kHz, což je velká odchylka od našeho kmitočtu, jelikož už bychom mohli přijímat signály některých stanic, které by mohly na těchto frekvencích vysílat. Proto si cívku raději vyrobíme sami.

Pro tuto malou indukčnost (234  $\mu H$ ) nám bude stačit namotání jednovrstvé vzduchové cívky. K výrobě takové cívky budeme muset znát také parametry kostry, na kterou ji budeme chtít namotat. Mezi tyto parametry patří například průměr a délka cívky, průměr drátu a počet závitů a samozřejmě také indukčnost. Protože indukčnost již známe, stačí nám dopočítat pouze počet závitů, průměr a délka cívky. Při praktickém zhotovování válcových jednovrstvových cívek se velmi často používá provedení, kdy se průměr rovná délce vinutí. V tom případě nám odpadá nutnost používání Nagaovy konstanty a lze pro výpočet počtu závitů použít zjednodušený vzorec, který je v praxi často používáný.

### ( 9) Zjednodušený vzorec pro výpočet cívky

$$N = 12,13 \cdot \sqrt{\frac{L}{d}} \quad [L, \mu H, cm]$$

Při realizaci zkušební vzorku jsem měl k dispozici válcovou cívku o rozměrech 24 x 24 mm. Jelikož byl průměr i délka vinutí stejně dlouhé, mohl jsem použít k výpočtu závitů tento zjednodušený vzorec.

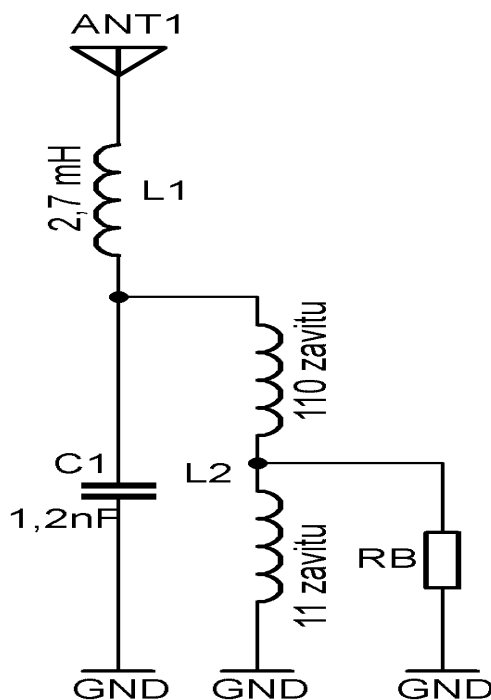
### ( 10) Výpočet počtu závitů cívky

$$N = 12,13 \cdot \sqrt{\frac{234,53}{2,4}} = 120,9$$

Po dosazení do vzorce jsem zjistil, že potřebuji namotat na cívce 121 závitů, abych dosáhl indukčnosti 234  $\mu H$ . U namotané vzduchové cívky je při přidání do obvodu nutné brát ohled na to, aby nebyla umístěna na kovové podložce, jelikož by podložka k cívce přidala závity nakrátko, čímž dochází ke změně indukčnosti (snížení) a tím by došlo k ovlivnění rezonanční frekvence. Na zkušebním vzorku však žádná kovová podložka nebude, takže je možná změna indukčnosti této cívky eliminována.



Nyní, když už je navrhnut rezonanční obvod a jsou vypočteny hodnoty kondenzátoru a cívky, je nutné říct, proč byly tyto hodnoty takto voleny. Důvodem je tzv. činitel jakosti, který je pro ideální nezatížený paralelní rezonanční obvod definován jako  $Q = \sqrt{\frac{C}{L}}$ , na činiteli jakosti závisí také šířka pásma a selektivita obvodu. Je tedy v našem zájmu, aby činitel jakosti byl co



**obr. 15 Paralelní rezonanční obvod**

největší, toho dosáhneme tak, že zvolíme co největší hodnotu kapacity a naopak co nejmenší hodnotu indukčnosti. Tento vzorec však v reálném případě neplatí, jelikož k našemu paralelnímu obvodu je připojen ještě vstupní odpor tranzistoru. Díky odporu se změní i výsledné schéma paralelního rezonančního obvodu, což má vliv na hodnotu činitele jakosti, toto schéma je zobrazeno na obr. 15. Přičemž odporem RB se myslí vstupní odpor tranzistoru.

Díky vstupnímu odporu se nám vzorec pro činitele jakosti změní na:

**( 11) Činitel jakosti PRO**

$$Q = \frac{R}{\omega \cdot L} = R \cdot \omega \cdot C = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad [-, \Omega, F, H]$$

Z toho vzorce je patrné, že chceme-li zvýšit činitel jakosti je pro nás důležité zvýšit odpor působící v paralelním obvodu. Ke zvýšení činitele jakosti tedy vedou 2 cesty. První možností je zvýšit vstupní odpor (nejlépe výměnou tranzistoru za operační zesilovač, jehož vstupní odpor je řádově v MΩ). Druhou možností je snížit vliv malého vstupního odporu, což můžeme udělat buď pomocí transformátoru, nebo cívky s odbočkou díky čemuž nám vzroste vstupní odpor.

V tomto případě jsem zvolil možnost cívky s odbočkou (autotransformátoru), jelikož cívka již byla namotána a udělat na ní odbočku nedalo moc práce. Jelikož jsem měl k dispozici 121 závitů, rozdělil jsem je v poměru 10:1 (110:11 závitů). Při tomto rozdělení jsem získal převod mezi jednotlivými cívkami roven  $p=10$ . Počet závitů je pro tento případ vztažen k cívce L1 234 $\mu$ H (viz. obr. 14). Vstupní odpor tranzistoru se nám poté zvýší díky závislosti tohoto odporu a převodu dle :

**( 12) Zvýšení vstupního odporu**

$$R_{výsledný} = p^2 \cdot R_{vstupní}$$

Vstupní odpor tranzistoru bývá zhruba 2 K $\Omega$  u většiny tranzistorů, v našem případě tedy budeme také uvažovat tuto hodnotu odporu a po dosazení získáme:

**( 13) Výsledný vstupní odpor**

$$R_{výsledný} = 10^2 \cdot 2000 = 200 \text{ K}\Omega$$

Nyní, když už známe všechny potřebné hodnoty pro výpočet výsledného činitele jakosti, můžeme je dosadit a dostaneme:

**( 14) Výsledný činitel jakosti**

$$Q_{výsledný} = 2 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-9}}{234 \cdot 10^{-6}}} = 452,9$$

Při takto velkém činiteli jakosti nám dojde k tomu, že rezonanční křivka bude úzká a strmá, přesně tak, jak by měla vypadat. Jak již totiž bylo zmíněno, na činiteli jakosti závisí šířka pásma, která by měla být co nejúžší, abychom naším přijímačem nezachytávali zbytečné velký rozsah kmitočtů, ale jen kmitočtu v námi zvolené oblasti (300 kHz). Šířka pásma je definovaná jako:

**( 15) Šířka pásma přijímače**

$$B = \frac{f_{rezonanční}}{Q} = \frac{3 \cdot 10^5}{452,9} = 662 \text{ Hz}$$

Pro naše hodnoty frekvence a činitele jakosti má tedy výsledná šířka pásma hodnotu 0,662 kHz. Tento rozsah je udáván pro pokles o 3 dB.

Jak již bylo zmíněno se šířkou pásma a činitelem jakosti souvisí také tzv. selektivita obvodu. Selektivita vyjadřuje schopnost propuštění pouze určité části kmitočtového spektra. Jeho hodnota se rovná rozdílu mezi maximální a minimální přenosovou frekvencí. Maximální/minimální přenosová frekvence je frekvence, při níž klesne hodnota přenášeného výkonu o polovinu. Z pohledu hodnot napětí, proudu se jedná o pokles 3 dB na obě strany od špičkové hodnoty, tedy hodnoty šířky pásma na obě strany. Jinými slovy v našem případě bude náš obvod vybírat frekvence pro přijímání v rozsahu 299,66 až 300,331 kHz, což

odpovídá hodnotám  $300 \text{ kHz} \pm (0,662/2) \text{ kHz}$ . To znamená, že tyto frekvence bude náš detektor zachycovat a přijímat, jiné budou potlačeny.

Poslední částí laděného obvodu je kondenzátor C2 s hodnotou 120 nF. Tento kondenzátor slouží jako kapacitní vazba na tranzistor. Jeho funkcí je zabránění zkratu báze s emitorem tranzistoru T1 vinutím cívky. Hodnota byla volena tak, aby byla kapacita dostatečně velká, aby jí prošel náš kmitočet 300 kHz. Pro střídavé proudy se totiž uplatňuje jeho frekvenční závislost, která je dána:

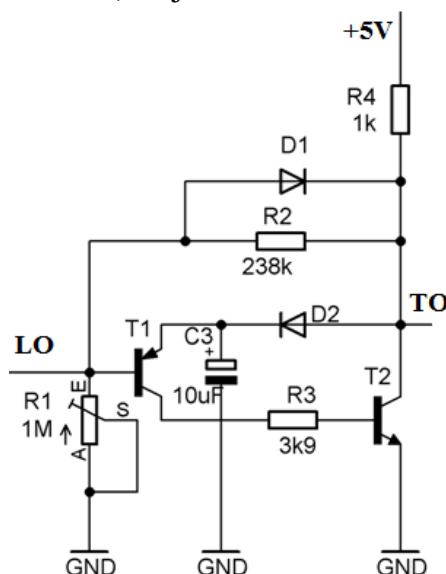
( 16) **Reaktance C2**

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 120 \cdot 10^{-9}} = 4,420 \Omega$$

To znamená, že při naší frekvenci 300 kHz se kondenzátor bude chovat jako rezistor s odporem 4,42  $\Omega$ . Naším zájmem je mít tuto hodnotu odporu co nejmenší, což náš kondenzátor 120 nF splňuje. Nejnižší hodnota musí být proto, že anténa se při zachycení signálu chová jako zdroj napětí, a reaktance kondenzátoru společně se vstupním odporem tranzistoru nám tvoří dělič. Na tomto děliči by při velké hodnotě reaktance docházelo k úbytku napětí a do detektoru by poté nešlo plné napětí odebírané z antény. Protože je ale splněna podmínka, že  $X_C \ll R_{VST}$ , můžeme hodnotu odporu cívky zanedbat. A předpokládat, že do detektoru jde plné napětí z antény.

### 3.4.3 Zesilovač, detektor

Nyní se dostáváme k nejdůležitější části zařízení, kterou je samotný detektor, který zpracovává signály o frekvenci 300 kHz z laděného obvodu a posílá je na vstup tvarovacího obvodu, ze kterého jde poté do čítače. Na obr. 16 můžeme vidět celkové zapojení detektoru, i s jeho hodnotami.



obr. 16 Detektor

Po vysvětlení principu jeho fungování si detailně rozebereme výpočet hodnot jednotlivých prvků. Princip funkce sestaveného detektoru je následující. V klidovém stavu jsou tranzistory T1 a T2 uzavřeny. Kondenzátor C3 je nabit přes rezistor R4 a diodu D1 na hodnotu přibližně 5V ( $5 \cdot U_d$ ). Když přijde z laděného obvodu (LO) na bázi tranzistoru T1 záporný impuls proti zemi, T1 sepne. Proud kolektoru T1 je proudem báze tranzistoru T2, který také sepne. Kondenzátor C3 nyní napájí T1, a je to jediný napájecí zdroj, jelikož D1 je polovaná v závěrném směru a je uzavřena a tím je uzavřeno i napájení +5V ze stabilizátoru. Tento stav nabíjení kondenzátorem C3 setrvává až do doby, dokud napětí báze T2 nepoklesne na hodnotu uzavíracího napětí (cca 0,5 V). Pak se T2 uzavře, zablokuje se i T1 a kondenzátor C3 se opět nabíjí přes R4 a D1 a čeká na další impuls. Výstup z kolektoru T2 je poté vstupem do tvarovacího obvodu (TO), kde se zpracuje.

První hodnota, která byla zvolena je hodnota maximálního kolektorového proudu tranzistoru T2. Tato hodnota byla zvolena na 5 mA. Abychom zajistili tento maximální proud, musíme určit správnou hodnotu odporu R4, která je:

**( 17) Výpočet odporu R4**

$$R_4 = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,005} = 1 \text{ K}\Omega$$

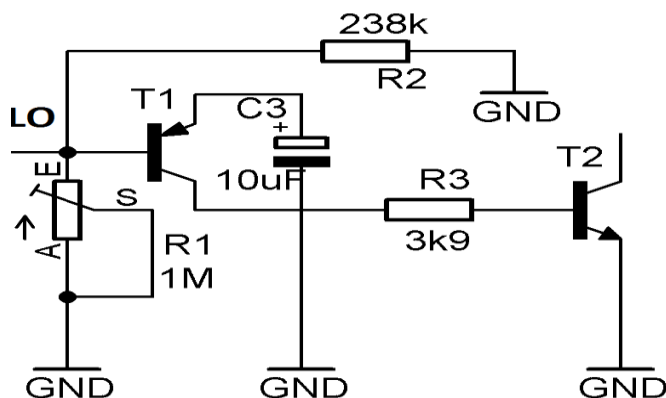
Jak již bylo zmíněno, pokud nepřichází žádný impuls a obvod je v klidovém stavu nabíjí se kondenzátor C3 na hodnotu zhruba 5V, skutečná hodnota se vypočítá jako napájecí napětí – úbytek napětí na diodě.

**( 18) Výpočet napětí C3**

$$U_{C3} = U_{CC} - U_{d1} = 5 - 0,6 = 4,4 \text{ V}$$

Celkové napětí na plně nabitém kondenzátoru C3 je tedy 4,4 V.

Pokud však přijde z laděného obvodu signál z bleskové aktivity, sepne tranzistor T1, jelikož je však dioda D1 v závěrném směru, celé zapojení obvodu se po dobu trvání vybíjení kondenzátoru C3 chová, jak je znázorněno na obr. 17.



**obr. 17 Chování detektoru při zaznamenání bleskové aktivity**

Nabitý kondenzátor C3 se nyní chová jako zdroj napětí 4,4V a postupně se vybíjí přes rezistor R3 do báze tranzistoru T2. Jako NPN tranzistor T2 ve spínacím režimu jsem zvolil typ BC639-TA CDIL s parametrem  $\beta = 100-250$  a napětím maximálně 80V. Vybíjení trvá tak dlouho, než je napětí baterie vybito pod úroveň 0,5V což je uzavírací hodnota tranzistoru T2 z katalogového listu.

Nyní je na řadě určení hodnot C3 a R3, tento požadavek je dán zvolením vhodné tzv. časové konstanty  $\tau = R \cdot C$ , která bude hrát důležitou roli při určování doby trvání impulsu. Po tuto dobu se obvod bude chovat tak, jak je vidět na obr. 17. A po jeho skončení jeho chování se začne opět nabíjet C3 a vyčkávat na impuls. Požadavkem je, aby doba trvání byla co nejnižší, aby obvod signál nezpracovával zbytečně dlouho, a tak nestihnul zachytit případně další blesky. Tato doba je dána přechodovým dějem při vybíjení kondenzátoru. Výpočet napětí na kondenzátoru má tvar:

**( 19) Vybíjecí rovnice kondenzátoru**

$$U_{C3} = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{C \cdot R}}$$

Toto je standardní rovnice pro vybíjení kondenzátoru. My však budeme muset počítat navíc ještě se sériově zapojeným vstupním odporem tranzistoru T2, výsledná rovnice teda bude mít tvar:

**( 20) Vybíjecí rovnice C3**

$$U_{C3} = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{C3 \cdot (R2 + R_{vst})}}$$

*Kde :  $U_{max}$  = maximální napětí na C3 (4,4V)*

*$U_{C3}$  = aktuální hodnota napětí C3*

*$R_{vst}$  = vstupní odpor tranzistoru T2*

*$t$  = čas vybíjení kondenzátoru*

Jelikož nás zajímá celková doba trvání vybíjení kondenzátoru, musíme tuto dobu vyjádřit z vybíjecí rovnice C3, její výsledný tvar bude:

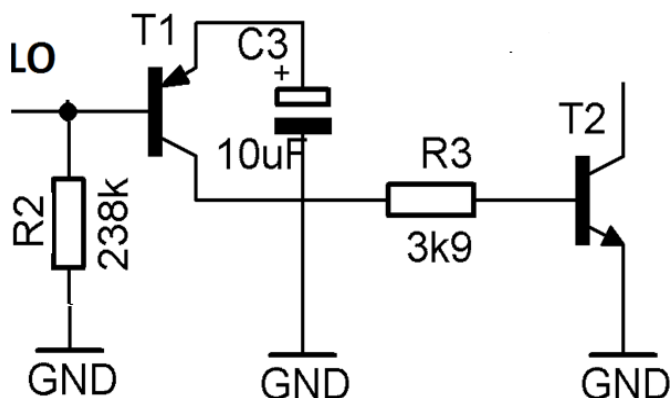
**( 21) Vyjádření doby vybití C3**

$$t = -\ln\left(\frac{U_{C3}}{U_{max}}\right) \cdot C_3 \cdot (R_3 + R_{vst})$$

Vstupní odpor tranzistoru se pohybuje v rozmezí 1-20 K $\Omega$ , přičemž typicky bývá kolem 4 K $\Omega$ . Pro náš případ zvoleného tranzistoru BC639-TA CDIL jsme učili vstupní odpor z katalogových hodnot na  $\frac{V_{CEO}}{I_B} = \frac{80 \text{ V}}{0,05 \text{ A}} = 1600 \Omega$ .

Nyní tedy stačí vhodně zvolit hodnoty kondenzátoru C3 a rezistoru R3, aby byla vhodná časová konstanta a co nejrychlejší zpracování impulsu. Při zvolení kombinace odporu 3k9 a hodnoty kapacity 10  $\mu$ F. Vychází doba trvání impulsu

přibližně 0,12 sekund to je ideální hodnota, jelikož je rychlá a přitom dostatečně dlouhá pro celý proces zpracování signálu. Proto jsem zvolil tuto kombinaci.



**obr. 18 Chování obvodu při impulsu s odporem R2**

U výpočtu bylo třeba počítat do hodnoty napětí  $U_c=0,5V$  (uzavírací hodnota T2)  
( 22) Doba trvání vybíjení C3

$$t = -\ln\left(\frac{0,5}{4,4}\right) \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot (3,9 + 1,6) \cdot 10^3 = 0,119s$$

Nyní už zbývá jen určit hodnotu rezistoru R2, jak lze vidět na obr. 18  
Předpokládejme nyní plně nabitý kondenzátor na hodnotu 4,4 V při zachycení impulsu, ten se chová opět jako zdroj napětí. PNP tranzistor T1 pracuje ve spínacím režimu, a reaguje na záporný impuls z laděného obvodu. Typ tranzistoru byl zvolen MPSA56 s koeficientem  $\beta = 100$ . Tento tranzistor byl volen na základě určeného koeficientu  $\beta$ , a také díky rychlosti spínání Nyní musíme určit maximální kolektorový proud (při plném napětí 4,4V) při sepnutém tranzistoru T1, který vstupuje přes odpor R2 do báze tranzistoru T2, ten vypočítáme jako:

**( 23) Určení kolektorového proudu**

$$I_{Cmax} = \frac{U_N}{R_3 + R_{vst}} = \frac{4,4}{(3,9 + 1,6) \cdot 10^3} = 0,8mA$$

Tento proud postupně klesá s vybíjením kondenzátoru. Jelikož tranzistor T1 pracuje ve spínacím režimu, je nutné určit jeho nasycený bázevý proud  $I_{BN}$ , který je potřebný k sepnutí tranzistoru. K tomuto výpočtu budeme potřebovat parametr  $\beta$  a také tzv. činitel nasycení  $k$ . Ten se volí v rozmezí 1,5 – 2 a určuje míru rezervy proudu potřebnou k sepnutí, tento parametr volím jako  $k = 2$ . Nasycený bázevý proud se tedy vypočítá jako:

#### ( 24) Výpočet bázevého proudu

$$I_{BN} = \frac{I_{Cmax}}{\beta} \cdot k = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot 2 = 16 \mu A$$

Jako poslední zbývá výpočet rezistoru R2, který se vypočítá dle Ohmova zákona, přičemž nesmíme zapomínat na úbytek napětí na T1, rovnice tedy bude:

#### ( 25) Výpočet odporu R2

$$R_2 = \frac{U_N - U_{BE}}{I_{BN}} = \frac{4,4 - 0,6}{16 \cdot 10^{-6}} = 238 K\Omega$$

Ted' už zbývá jen popsat funkci diody D2 a odporu R1.

Dioda D2 plní pouze ochrannou funkci, má za úkol chránit detektor před případnými napěťovými špičkami z napájení a k celkovému zamezení vniku napětí ze směru napájení.

Potenciometr R1 byl ke schématu doplněn z důvodu možnosti nastavování citlivosti detektoru, při zvýšení odporu totiž detektor nebude zachycovat slabší signály. Naopak při nastavení malého odporu bude detektor zachycovat i slabší signály. Jeho velká hodnota (1 MΩ) byla volena proto, aby neovlivňoval činnost detektor a vypočítané parametry.

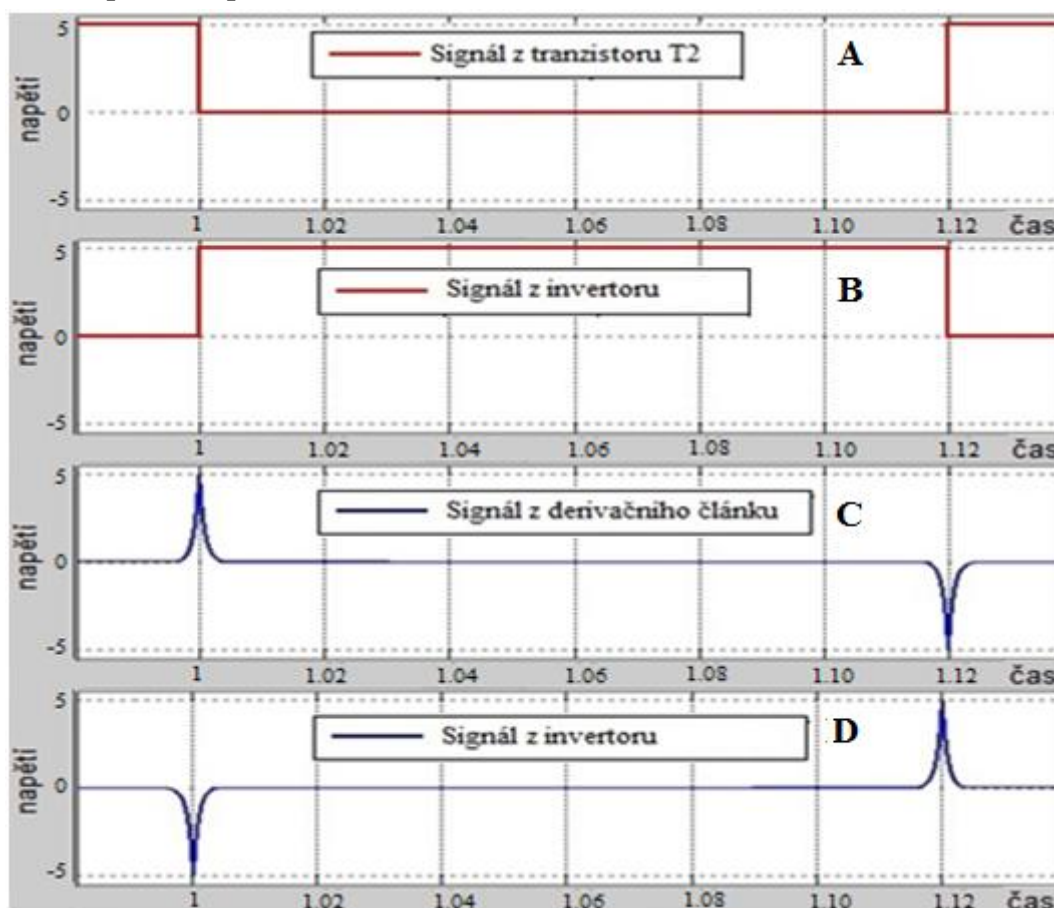
Poslední součástí z detektoru je již zmíněný tranzistor T2, ze kterého odvádíme signál na další blok. Při zachycení impulsu se tranzistor T2 sepne, čímž se vodivě spojí se zemí (GND). Na jeho kolektoru se v tu chvíli objeví záporný (nulový) impuls, ke kterému je připojen tvarovací obvod ze kterého poté signál bude pokračovat do čítače.

### 3.4.4 Tvarovací obvod

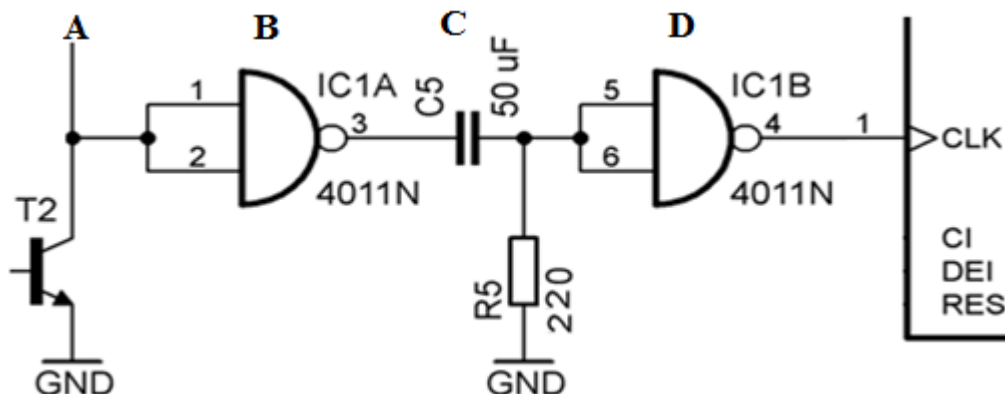
Pro tvarování signálu jsem použil obvod 4011N, což je CMOS obvod obsahující 4x dvouvstupové hradlo NAND. Tento obvod byl použit ze 2 důvodů. Prvním důvodem je to, že může pracovat pro dost široký rozsah napájecích napětí. Druhým to, že má malou vlastní spotřebu (výrazně nižší než obvody TTL).

Nyní je potřeba signál odebíraný z kolektoru tranzistoru T2 upravit na jediný impuls, který půjde do čítače. Úprava signálu je nutná jednak proto, že signál o sepnutí je indikován uzemněním tranzistoru (nulový puls v jinak konstantní kladné hodnotě napětí) průběh znázorněn na obr. 19 (A). Dalším důvodem použití tvarovacího obvodu je vytvoření 1 velmi krátkého impulsu, jelikož čítač by při dlouhé konstantní úrovni signálu mohl zaznamenat více signálů, než jen 1, což by znamenalo, že by údaje na čítači neodpovídaly skutečnému počtu blesků.

Čítač pracuje jako počítačadlo s určitou frekvencí a pokud bychom na jeho vstup poslali úroveň signálu, která by měla delší trvání než je frekvence čítače, došlo by k tomu, že čítač by hodnotu z jednoho impulsu mohl započítat vícekrát. Proto je zde snaha a o vytvoření pouze 1 jediného krátkého impulsu. V prvním kroku musíme nulové napětí při uzemnění tranzistoru T2 invertovat na kladnou úroveň, která bude mít délku pulsu rovnou době trvání impulsu (0,12 sekund). Inverze signálu se provede pomocí hradla NAND (viz obr. 19 (B), obr. 21).



obr. 19 Průběh zpracování impulsů



obr. 20 Zapojení tvarovacího obvodu



Nyní, když už máme signál v požadovaném tvaru, je potřeba z napěťové úrovně udělat 1 impuls, toho docílíme použitím derivačního článku se správně zvolenou časovou konstantou  $\tau$ . Ta musí být zvolena tak, aby byla její doba menší, než perioda signálu ( $\tau < T_{\text{sig}}$ ). Aby nedošlo ke zdeformování nabíjecí nebo vybíjecí křivky kondenzátoru při přechodovém ději, volí se většinou doba trvání vybíjení kondenzátoru z derivačního článku o trochu menší, než  $T_{\text{sig}}/2$ . Jelikož známe dobu trvání jednoho impulsu, zvolil tuto dobu jako  $0,05 \text{ s} \approx T_{\text{sig}}/2$ . Vyjádřením z vybíjecí rovnice kondenzátoru získáme hodnoty odporu, nebo kapacity, která nám udává výslednou časovou konstantu  $\tau$ . Jednu hodnotu si však budeme muset zvolit, proto jsem zvolil kondenzátor, který se vyrábí v nižších řadách vůči odporům, jako  $C_5 = 50 \text{ }\mu\text{F}$ . Jelikož chceme, aby byl kondenzátor v době  $0,05 \text{ s}$  úplně vybitý, musíme dosadit za napětí na kondenzátoru velmi malou hodnotu, jelikož po odlogaritmování bychom dostali nedefinovanou hodnotu, uvažujme tedy například  $\frac{1}{100}$  maximální hodnoty napětí. V našem případě bude tato hodnota  $\frac{1}{100} \cdot 5 = 0,05 \text{ V}$ . Odpor  $R_5$  bude mít hodnotu:

**( 26) Odpor  $R_5$**

$$R_5 = -\frac{t}{\ln\left(\frac{x}{U_{CC}}\right) \cdot C_5} = -\frac{0,05}{\ln\left(\frac{0,05}{5}\right) \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 220 \Omega$$

**x = hodnota  $\rightarrow 0$ , jelikož hodnota  $\ln(0)$  není definovaná**

Zvolené a vypočítané hodnoty nám dávají časovou konstantu:

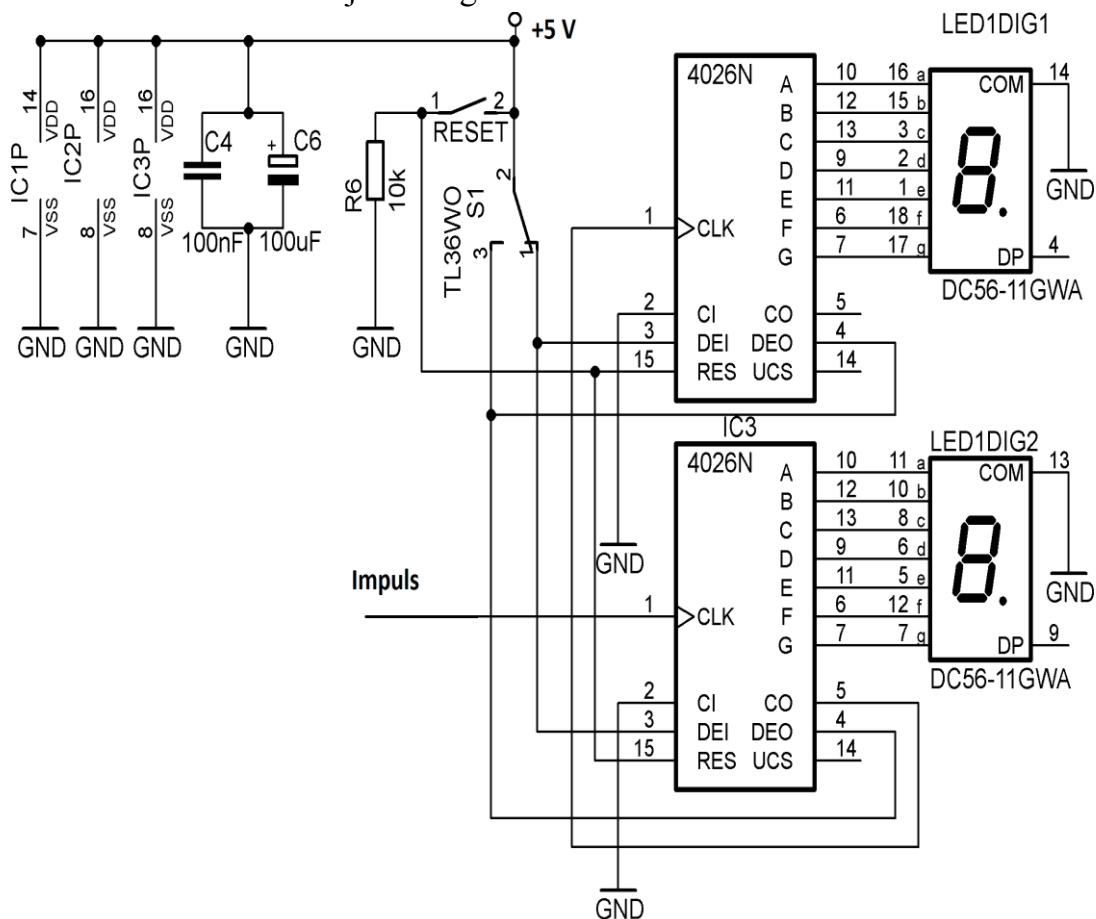
**( 27) Výpočet časové konstanty**

$$\tau = R_5 \cdot C_5 = 220 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 11 \text{ ms}$$

Při takto zvolené časové konstantě bude projev derivace výrazný, což znamená, že získáme jeden krátký impuls, jak lze vidět na obr. 19 (C). Můžeme říct, že platí  $\tau < T_{\text{sig}}/2 \rightarrow 0,011 \text{ s} < 0,06 \text{ s}$ . Jak lze vidět signál z derivačního článku obsahuje pouze jednu špičku, a poté po čas trvání impulsu je nulový, až do jeho skončení. Dále se signál opět invertován, aby byla špička zaznamenána v dobu, jakou by se zaznamenala bez zpracování (viz. obr. 19 (D)). Takto zpracovaný signál pak míří na hodinový vstup čítače, kde se poté přičte k zaznamenávané hodnotě blesků, která se nám zobrazí na displeji.

### 3.4.5 Čítač

Pro sestavení čítače jsem se rozhodnul pro použití CMOS čítače CD4026B s TTL logikou a napájením 5V z baterie. Největší výhodou tohoto zvoleného čítače je to, že má v sobě integrovaný BCD převodník, a tudíž lze výstup z jednotlivých pinů propojit přímo s číselným zobrazovačem, což je velká výhoda. Další užitečnou vlastností tohoto čítače je to, že obsahuje piny i pro tzv. uspání displeje, přičemž se nezastaví průběh počítání impulsů. Tato vlastnost je užitečná zejména pro snížení odběru proudu a tím pádem také prodloužení výdrže baterie, což vede k možnosti dlouhodobějšího používání. Jako zobrazovací displej byl zvolen sedmisegmentový displej se společnou katodou typu DC56-11GWA. Hlavní předností toho displeje je malý odběr proudu, který je podle katalogových hodnot 20 mA na celou sedmisegmentovou číslici, což znamená zhruba 3 mA na jeden segment.



obr. 21 Zapojení čítače

Nyní si celé schéma zapojení postupně rozebereme a zdůvodníme řešení tohoto obvodu. Napájecí napětí 5 V ze stabilizátoru je přivedeno na piny čítače CD4026B číslo 16, které slouží k připojení napájení a piny číslo 8 jsou určeny

pro uzemnění součástky. Paralelní kombinace elektrolytického kondenzátoru C a kondenzátoru C14 má ochrannou funkci. Tato ochranná funkce spočívá v zabránění průniku napětíových špiček. Elektrolytický kondenzátor 100  $\mu$ F je určen pro zabránění průniku špiček pro nízké kmitočty. V případě kondenzátoru 100 nF jde o zabránění průniku špiček naopak pro vysoké frekvence. Tato kombinace kondenzátorů je určitým standardem a zároveň kompromisem v obraně proti náhodným napětíovým špičkám, která se používá především pro impulzově spínané obvody jako je tento (impulzově spínané obvody jsou v tomto případě čítač, detektor). Jejich účelem je tedy potlačení náhodných napětíových impulzů, které se nesmí ve vedení šířit. Mezi ně patří také zákmity napětí při připojení napájení, které by čítač mohl považovat za detekci blesku.

Impuls, který přichází z tvarovacího obvodu, jde na vstup CLK prvního čítače odkud se postupně vysílají signály pro sepnutí jednotlivých pinů 6 až 13 (s výjimkou pinu 8, který je určen pro uzemnění čítače), které v sobě mají informaci o rozsvícení jednotlivých segmentů displeje označených A až G. Jednotlivé segmenty se rozsvítí podle toho, jaká číslice se právě má zobrazit, což čítač díky integrovanému BCD převodníku ví. Jakmile dojde u prvního čítače k dosažení číslice 9 a přijde další impuls, dojde k přetečení a vyšle se z pinu číslo 5 (Carry out) prvního čítače signál na vstup CLK druhého čítače, který bude pokračovat v čítání stejně jako první čítač (při přivedení impulsu do CLK). První čítač od této doby opět počítá od nuly a tak se cyklus opakuje. Takto vytvořený čítač může mít tedy libovolný počet míst, stačilo by přidat další čítače a displeje a propojit pin 5 (CO) se vstupem dalšího čítače CLK. V tomto zapojení je ovšem realizován pro čítání do 99 (2 čítače) jelikož vzdálenost, na kterou detekujeme blesky, je pouze v blízkém okolí detektoru, je zbytečné rozšiřovat počet číslic.

Resetování čítače se provádí přivedením kladného napájecího napětí na piny 15 (RES). Po přivedení tohoto napětí a sepnutí spínače (RESET) se v displeji vynulují hodnoty a čítač začíná počítat znovu od 0. To samé se stane, pokud dojde k překročení maximálního počtu číslic (v našem případě při překročení čísla 99). Přepínačem (TL36WO) lze volit, chceme-li aby displej zobrazoval jednotlivá čísla, nebo při přepnutí do polohy 2 na které jsou připojeny piny 4 (DEO) můžeme displej uvést to tzv. spánkového režimu, kdy se číslice a impulsy budou zaznamenávat, ale displej je nebude zobrazovat. Toto řešení slouží hlavně díky úsporám baterie. Uživatel však displej může kdykoliv přepnout zpět do první polohy, na které se nachází piny č. 3 (DEI) a podívat se na aktuální počet zaznamenaných blesků.

### 3.4.6 Stabilizátor

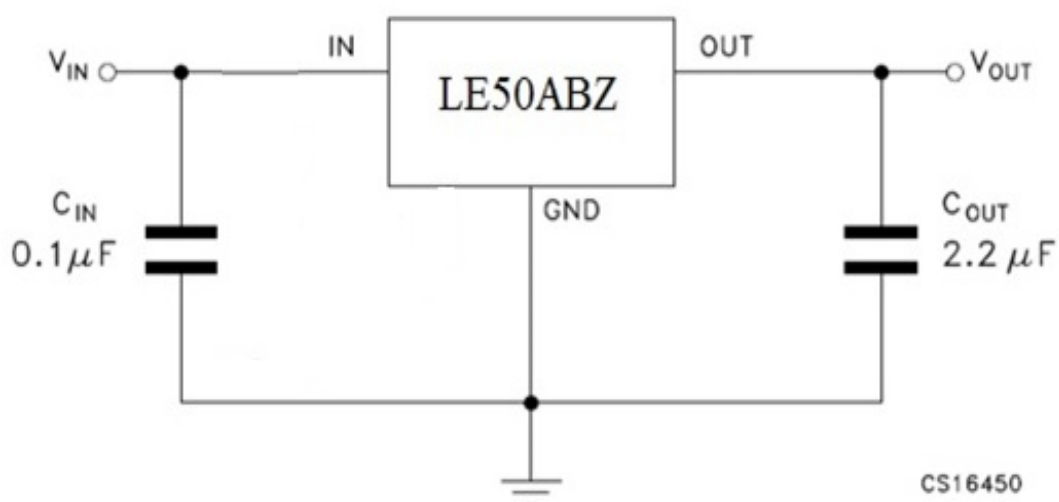
Vzhledem k použití baterií jako napájecího článku, jsem do obvodu také zařadil stabilizátor napětí. Úkolem stabilizátoru je udržování napětí z baterie na konstantní hodnotě 5V a vyhlazení jeho zvlnění, jelikož napětí odebírané přímo z baterie nemá hladký průběh. Volba stabilizátoru napětí záležela především na odběru proudu jednotlivých součástek z celého výrobku a na možné úbytky napětí, které bude stabilizátor schopen zpracovat. Jelikož při návrhu stabilizátoru byl testovací vzor výrobku již udělaný, mohl být tento odběr změřen pomocí ampérmetru. Ostatní hodnoty pak byly také vyčteny z katalogových hodnot použitých součástek. V Tabulka č. 1 je seznam součástek s uvedeným proudovým odběrem a celkovým odběrem celého navrženého detektoru.

Součástka	Odběr [mA]	Počet kusů
Laděný obvod, detektor, tvarovací obvod, zesilovač	0,14	1
Indikace zapnutí HLMP-1790 (katalogová hodnota)	2	1
Čítač CD 4026 (katalogová hodnota)	3,2	2
Displej DC56-11GWA (katalogová hodnota)	40	1
Tvarovací obvod CD 4011B (katalogová hodnota)	3,2	1
Celkem	51,74 mA	

**Tabulka č. 1 Proudový odběr součástek**

Z tabulky je zřejmé, že odběr proudu je malý. Z důvodu použití baterie je vhodné použít stabilizátor LE50ABZ z důvodu nízkého úbytku napětí a jeho nízké spotřebě a to vzhledem k prodloužení doby výdrže a tím i úspory energie. Proto jsem se rozhodnul pro použití tříbodového stabilizátoru LE50ABZ ze série Very Low Drop stabilizátorů, vzhledem k tomu že splňuje požadavky na nízký odběr a je schopen pracovat s dodávaným proudem do 100 mA. Tyto požadavky náš detektor splňuje a jeho použití je hlavně pro bateriové napájení. Také jako jedna z hlavních vlastností je jeho nízký úbytek napětí, se kterým je schopen pracovat. Z katalogových hodnot jsem zjistil, že hodnota úbytku napětí je 0,2 V. To znamená, že jako napájení musíme použít nejméně 5,2 V, aby byl stabilizátor vůbec schopný pracovat. Pokud by došlo k poklesu napětí pod 5,2 V, přestal by stabilizátor plnit svojí funkci a odebírali bychom napětí přímo z baterie.

Na obr. 22 jde vidět zapojení uváděné v katalogu, hodnoty kondenzátorů jsou minimální, které mohou být použity, při nižších hodnotách by stabilizátor neplnil správně svou funkci, protože hodnoty těchto kondenzátorů zaručují jeho stabilitu. Větší hodnoty kondenzátoru však při zapojení klidně mohou být použity.



obr. 22 Zapojení stabilizátoru z katalogu

Z Tabulka č. 1 je také patrné, že bychom byli schopni s přidáním dalšího čítacího obvodu (2x CD 4026B + DC56-11GWA) sestavit detektor, který by mohl počítat blesky až do hodnoty 9999 blesků. Vzhledem k tomu, že detektor je stavěn tak, aby zachytil blesky pouze v jeho blízkém okolí, není potřeba přidávat počet zobrazovaných číslic. Tento čítací obvod není přímo nutné napájet ze stabilizovaného napětí, ale mohl by být připojen přímo k baterii. Vzhledem k malému odběru však zařazení čítacího obvodu za stabilizátor nemá žádný vliv. V úvahu by také v zájmu snížení spotřeby přišlo použití LCD displeje vzhledem k jeho menšímu odběru proudu a tedy nižší spotřebě energie. Problém je však v tom, že zvolený čítač CD 4026B je určený pouze pro sedmisegmentové displeje, jelikož má v sobě již integrovaný BCD převodník stavěný s výstupy rovnou na jednotlivé segmenty. Proto s nimi nelze spínat LCD displej. Pokud bychom LCD displej chtěli použít, zvětšil by se nám počet součástek, jelikož bychom museli přidat BCD převodník, nahradit čítač za jiný a také bychom museli realizovat obvod pro podsvícení displeje. Schéma by poté bylo zbytečně rozsáhlé, cílem tohoto zapojení je použití co nejmenšího počtu součástek a tím i ušetření financí a to i vzhledem k tomu, že detektor by měl být přenositelný. Tyto úpravy jsou tedy za cenu sníženého odběru proudu sedmisegmentovým displejem vynechány.

### 3.4.7 Napájení

Vlastní indikátor bouřek bude napájen z bateriového zdroje. Z důvodu použití CMOS součástek s TTL logikou, která vyžaduje minimální napětí 4,5V bude nutno použít více sériově spojených akumulátorů. V úvahu však také musíme vzít použití stabilizátoru napětí LE50ABZ, který vyžaduje pro svou správnou funkčnost 5V + úbytek napětí 0,2 V. Z takového použití součástek plyne, že minimální hranice napětí, při kterém bude stabilizátor ještě fungovat je 5,2 V, při nižším napětí může dojít k poškození baterie.

Rozhodnul jsem se pro použití akumulátorů typu NiMH (Nikl-metal hydridový), mezi důvody jeho použití patří jejich značně velká kapacita a schopnost dodávat poměrně velký proud spolu s přijatelnou cenou. Nevýhodou tohoto akumulátoru je velká úroveň samovybíjení asi 15-30 % za měsíc při pokojové teplotě.

Při hledání nejvhodnějšího článku jsem narazil na akumulátor značky Sanyo a rozhodnul se pro jeho použití. Ve srovnání s jinými NiMH bateriemi nemá vysokou úroveň samovybíjení, ale jak je uvedeno v technických parametrech výrobce při dlouhodobém skladování má po 12 měsících stále 90% kapacity a po 60 měsících 75% kapacity. To je pro náš detektor, u kterého se nepředpokládá nepřetržitý provoz, ale provoz pouze při bouřkové aktivitě, velká výhoda. Další výhodou je přínos pro životní prostředí vzhledem k dlouhé životnosti a recyklovatelnosti. Tyto baterie jsou prodávány v nabitém stavu a lze je po jejich vybití dobít. Jak uvádí výrobce, tyto baterie jsou schopné vydržet až 1000 nabití.



obr. 23 Akumulátor Sanyo

Pro zapojení bude použito 5 akumulátorů s hodnotou svorkového napětí 1,2 V. Z toho plyne, že máme k dispozici  $5 \cdot 1,2 = 6 \text{ V}$  napájecího napětí. Přičemž v údajích výrobce je u každého akumulátoru při úplném vybití uvedena hodnota poklesu o 0,1 V, při tomto poklesu lze baterii považovat za vybitou. To znamená, že při úplném vybití všech 5 akumulátorů máme k dispozici stále  $6 - (5 \cdot 0,1) = 5,5 \text{ V}$ . Což znamená, že budeme mít zajištěných 5,2 V vždy i když budou akumulátory na konci životnosti. Jelikož je v zadání uvedena minimální požadovaná doba provozu zařízení 24 hodin. Volíme pro tuto dobu zvolit kapacitu baterie, která je dána vztahem:

( 28) Výpočet kapacity baterie

$$C = I \cdot t = 0,05 \cdot 24 = 1,2 \text{ [Ah, A, h]}$$

*C – kapacita baterie*

*I – proudový odběr zařízení (viz.stabilizátor)*

*t- požadovaná doba provozu*

Z výše uvedeného vzorce plyne, že budeme muset zvolit kapacitu baterie minimálně 1200 mAh, aby při nepřetržitém provozu po dobu 24 hodin byl detektor stále funkční. Jelikož nejbližší vyšší hodnota kapacity značky Sanyo je 1900 mAh, zvolil jsem tuto hodnotu a získal tak i rezervu 14 hodin provozu.

Tyto baterie jsou nabíjecí a lze při poklesu napětí baterii vyjmout a nabít.

### 3.4.8 Indikace zapnutí detektoru

Pro indikaci zapnutí jsem použil jednoduchý obvod s LED diodou, která se při připojení baterie rozsvítí a bude svítit až do odpojení baterie. Toto zapojení se nachází hned za stabilizátorem LE50ABZ. LED dioda byla zvolena typu L-HLMP-1790 zelené barvy o vlnové délce 568 nm. Byla zvolena díky jejímu nízkému odběru proudu 2 mA a úbytku napětí na diodě (1,8 V).

5V je odebíráno přímo ze stabilizátoru a dále se signál šíří do čítače a detektoru.

Výpočet odporu R7 probíhal za pomoci Ohmova zákona a výsledná hodnota je:

( 29) Výpočet odporu R7 u LED diody

$$R = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,8}{2 \cdot 10^{-3}} = 1600 \Omega$$

Nyní již známe všechny hodnoty součástek potřebné k sestavení detektoru.

## 4 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout jednoduchý detektor blesků, který pracuje tak, že zachytí impuls, který vyvolá blesk. Svou práci bych rozdělil na 2 části teoretickou a praktickou.

V první části jsem se zabýval teoretickým rozbořem vzniku, jednotlivých projevů, vlastností a následků bouřek. Ať už se jednalo o projevy větrné, akustické, srážkové nebo elektrické. Popsal jsem také detailní průběh blesků a také jejich rozdělení, které se většinou dělí na blesky vnitřní, mezi 2 mraky, nebo nejčastější blesk země-mrak. Dále jsem teoreticky popsal možnou detekci blesků, která spočívala buď v zachycování rádiových vln jak bylo použito v této práci, nebo na principu snímání z družic. Na konci tohoto rozboru jsem pomocí získaných teoretických znalostí z oblasti blesků a jejich průběhu specifikoval požadavky na vlastní indikátor bouřek.

V další části jsem sestavil blokové schéma a navrhnul obecné parametry a požadavky jednotlivých bloků a ujasnil si některé vlastnosti a funkce, které po detektoru požadují. Po definici jednotlivých bloků jsem začal postupně navrhovat parametry součástek a detailní schéma celého zapojení jednotlivých bloků z blokového schématu. Popsal jsem všechny bloky a pomocí získaných znalostí vypočítal všechny hodnoty součástek a zakreslil i průběhy, které popisovaly zpracování signálu zachyceného anténou. Při výpočtu hodnot součástek jsem také využil spoustu znalostí z předchozích kurzů, zejména při výpočtu tranzistorů, laděného obvodu.

V této bakalářské práci jsem získal spoustu teoretických znalostí o vzniku, průběhu i zániku bouří, které se dají využít v běžném životě, a také jsem pomocí nich byl schopen navrhnout indikátor bouřek. Tento teoretický základ byl nezbytný pro pochopení chování blesků a možnosti jejich indikace, podařilo se mi také splnit všechny požadavky, které byly kladeny v zadání práce a rozpracovat je. Tato bakalářská práce však neskončila pouze u návrhu, byl také sestrojen fungující testovací výrobek dle vypočtených hodnot a experimentálně ověřen. Jelikož však byl vyroben v době, kdy nemohl blesky detekovat (zima-jaro), byla jeho funkčnost ověřována nouzově, pomocí piezoelektrického zapalovače, který vydává slabé impulsy, které však byly v dostatečné blízkosti antény také zachyceny. V příloze č. 4 je fotografie testovacího výrobku.



## 5 SEZNAM ROVNIC

( 1) Výpočet vlnové délky .....	- 38 -
( 2) Výpočet vlnového odporu .....	- 38 -
( 3) Indukčnost prodlužovací cívky.....	- 38 -
( 4) Výpočet délky prodloužení.....	- 38 -
( 5) Thompsonův vztah .....	- 39 -
( 6) Vyjádření indukčnosti z Thompsonova vztahu .....	- 39 -
( 7) Výpočet indukčnosti.....	- 40 -
( 8) Kmitočet při cívce 220 uH .....	- 40 -
( 9) Zjednodušený vzorec pro výpočet cívky .....	- 40 -
( 10) Výpočet počtu závitů cívky .....	- 40 -
( 11) Činitel jakosti PRO.....	- 41 -
( 12) Zvýšení vstupního odporu .....	- 42 -
( 13) Výsledný vstupní odpor.....	- 42 -
( 14) Výsledný činitel jakosti .....	- 42 -
( 15) Šířka pásma přijímače .....	- 42 -
( 16) Reaktance C2.....	- 43 -
( 17) Výpočet odporu R1 .....	- 44 -
( 18) Výpočet napětí C3 .....	- 44 -
( 19) Vybíjecí rovnice kondenzátoru.....	- 45 -
( 20) Vybíjecí rovnice C3.....	- 45 -
( 21) Vyjádření doby vybití C3 .....	- 45 -
( 22) Doba trvání vybíjení C3 .....	- 46 -
( 23) Určení kolektorového proudu.....	- 46 -
( 24) Výpočet bázeového proudu.....	- 47 -
( 25) Výpočet odporu R2 .....	- 47 -
( 26) Odpor R5 .....	- 49 -
( 27) Výpočet časové konstanty .....	- 49 -
( 28) Výpočet kapacity baterie .....	- 55 -
( 29) Výpočet odporu R7 u LED diody.....	- 55 -

## 6 SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 Proudový odběr součástek.....	- 52 -
--	--------

## 7 LITERATURA

### Knihy

- [1] KŘIVSKÝ, Ladislav. *Bouře, hrom a blesk*. 1. vyd. Praha: Osvěta, 1952, 15 s.
- [2] STEKOL'NIKOV, I. *Bouře, blesky a hrom*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1952, 71 s., příl.
- [3] ŘEZÁČOVÁ D., NOVÁK P., KAŠPAR M., SETVÁK M.: *Fyzika oblaků a srážek*, Academia Praha 2007, AV ČR, str. 574, ISBN 978-80-200-1505-1
- [4] Burant J. Ing.: *Blesk a přepětí, Systémová řešení ochran*, Vydalo nakladatelství FCC Public s.r.o., Praha v roce 2006, ISBN 80-8653-10-3, str. 256.

### WWW stránky

- [5] CHUM, Jaroslav. *Šíření vln v zemské magnetosféře* [online]. Praha, 2001 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: [http://www.ufa.cas.cz/html/upperatm/chum/disertace/JChum\\_disertace.pdf](http://www.ufa.cas.cz/html/upperatm/chum/disertace/JChum_disertace.pdf)  
Disertační práce. Ústav fyziky atmosféry AV ČR. Vedoucí práce Prof. Pavel Kubeš, Csc.
- [6] SKŘEHOT, Petr. *Stručné základy teorie bouřek* [online]. Praha: Meteorologická Operativní Rada, 2004 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: [www.astronomie.cz/download/strucne-zaklady-teorie-bourek.pdf](http://www.astronomie.cz/download/strucne-zaklady-teorie-bourek.pdf)
- [7] O bouřkách. In: MAŇÁK, Roman. *Thunderstorm Observe Project* [online]. 2005 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <http://bourky.wz.cz/bourky.html>
- [8] Amatérská meteorologická společnost – občanské sdružení. *Amateur Stormchasing Society* [online]. 2005 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <http://www.bourky.com/teorie-bourek-i/>
- [9] Průvodce bouřkovou oblačností pro pozemní pozorovatele. In: PSIKA, Tomáš. *Bouřková oblačnost* [online]. 2002 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <http://www.bourky.kvalitne.cz/>
- [10] CHRISTIAN, Hugh J. *Lightning primer* [online]. The Global Hydrology Resource Center, 2009 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <http://thunder.msfc.nasa.gov/primer/primer3.html>
- [11] FYZIKA V POZADÍ :Elektřina [online]. 2001 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=424](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=424)
- [12] Český telekomunikační úřad [online]. 2013 [cit. 2013-11-22]. Plán přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka). Dostupné z WWW: [http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova\\_tabulka/vyhlaska\\_105-2010\\_sb038-10.pdf](http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf)
- [13] Jak vzniká kapka. In: *Meteorologie* [online]. 2005 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: [http://www.dlf.cz/About%20us/Meteorology/jak\\_vznika\\_destova\\_kapka.aspx](http://www.dlf.cz/About%20us/Meteorology/jak_vznika_destova_kapka.aspx)

## **8 SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha č.1 Seznam použitých součástí**

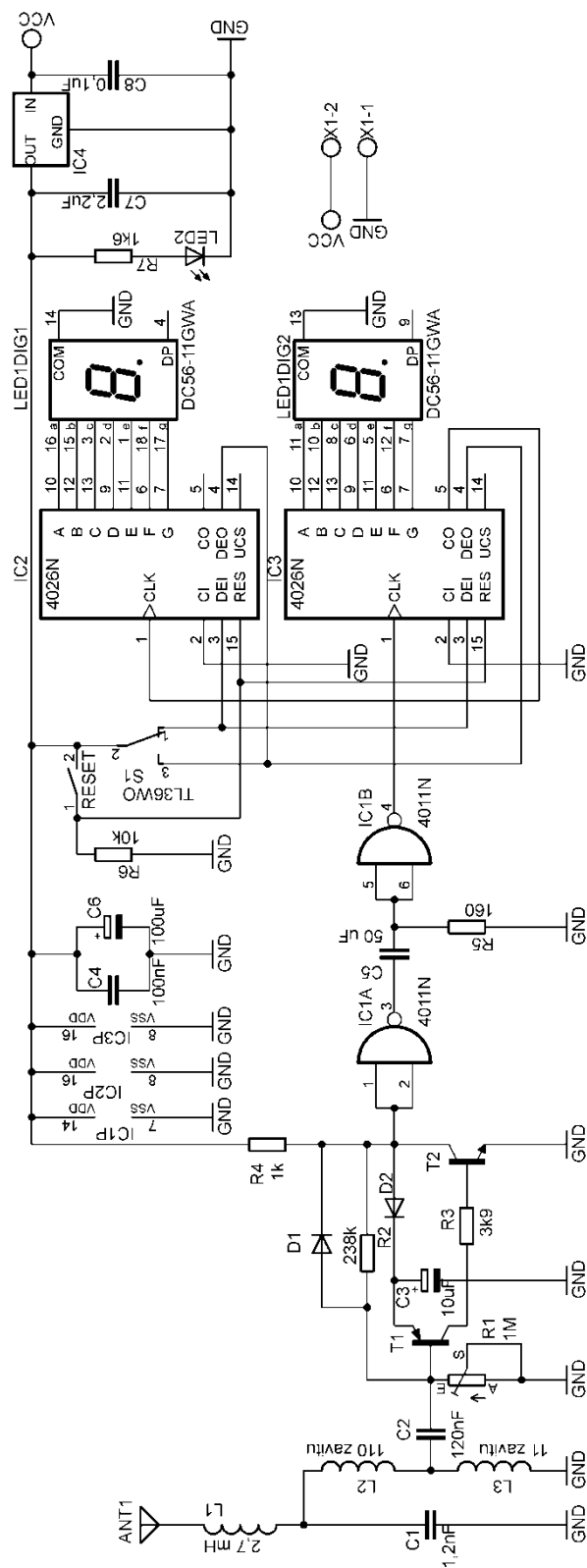
**Příloha č.2 Schéma zapojení indikátoru bouřek**

**Příloha č.3 Zapojení indikátoru bouřek (DPS)**

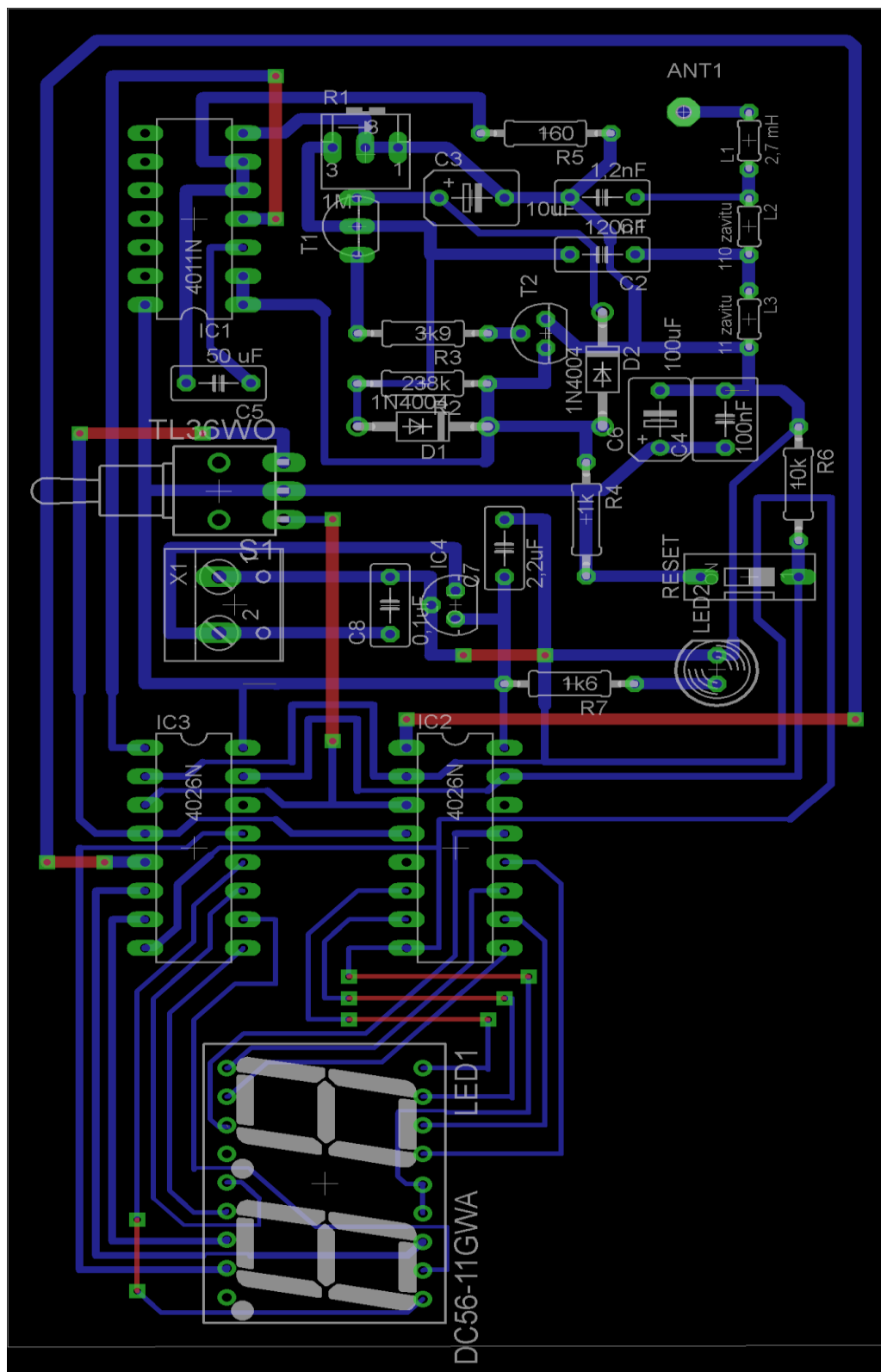
## Příloha č. 1

Seznam použitých součástek		
<b>ANT</b>	<b>-</b>	<b>Prutová anténa</b>
<b>C1</b>	<b>1,2 nF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>C2</b>	<b>120 nF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>C3</b>	<b>10 uF</b>	<b>Elektrolytický kondenzátor</b>
<b>C4</b>	<b>100 nF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>C5</b>	<b>50 uF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>C6</b>	<b>100 uF</b>	<b>Elektrolytický kondenzátor</b>
<b>C7</b>	<b>2,2 uF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>C8</b>	<b>0,1 uF</b>	<b>Keramický kondenzátor</b>
<b>D1</b>	<b>-</b>	<b>Ochranná dioda</b>
<b>D2</b>	<b>-</b>	<b>Ochranná dioda</b>
<b>IC1</b>	<b>-</b>	<b>Obvod NAND (4011N)</b>
<b>IC2</b>	<b>-</b>	<b>Čítač (4026N)</b>
<b>IC3</b>	<b>-</b>	<b>Čítač (4026N)</b>
<b>IC4</b>	<b>-</b>	<b>Stabilizátor LE50ABZ</b>
<b>L1</b>	<b>2,7 mH</b>	<b>Radiální tlumivka</b>
<b>L2</b>	<b>234 uH</b>	<b>1-vrstvá válcová cívka</b>
<b>LED1</b>	<b>-</b>	<b>7- segmentový displej DC56-11GWA</b>
<b>LED2</b>	<b>-</b>	<b>Indikační LED dioda</b>
<b>R1</b>	<b>1 MΩ</b>	<b>Potenciometr</b>
<b>R2</b>	<b>82 kΩ</b>	<b>Rezistor</b>
<b>R3</b>	<b>3k9</b>	<b>Rezistor</b>
<b>R4</b>	<b>1 kΩ</b>	<b>Rezistor</b>
<b>R5</b>	<b>220 Ω</b>	<b>Rezistor</b>
<b>R6</b>	<b>10 kΩ</b>	<b>Rezistor</b>
<b>R7</b>	<b>1k6</b>	<b>Rezistor</b>
<b>RESET</b>	<b>-</b>	<b>Tlačítko</b>
<b>S1</b>	<b>-</b>	<b>Spínač</b>
<b>T1</b>	<b>-</b>	<b>Tranzistor PNP</b>
<b>T2</b>	<b>-</b>	<b>Tranzistor NPN</b>

## Příloha č. 2 Schéma zapojení indikátoru bouřek



## Příloha č. 3



#### Příloha č. 4 Testovací výrobek

